

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2021.03.017

于正义, 夏建国, 肖欣娟, 等. 川西黄壤磷和氟在不同处理条件下的竞争吸附特征. 土壤, 2021, 53(3): 571–577.

川西黄壤磷和氟在不同处理条件下的竞争吸附特征^①

于正义, 夏建国*, 肖欣娟, 谢楠

(四川农业大学资源学院, 成都 611130)

摘要: 本研究利用响应面模型分析不同比例生物质炭、初始 pH、初始磷浓度以及初始氟浓度下川西黄壤磷和氟的竞争吸附特征, 以为土壤氟固定和土壤施肥技术提供新思路。研究表明: 在竞争作用下, 不同处理条件对磷的吸附量影响大小顺序为: 初始氟浓度 > pH > 初始磷浓度 > 生物质炭比例; 对氟的吸附量影响大小顺序为: 初始氟浓度 > 初始磷浓度 > pH > 生物质炭比例。考虑到各因素之间的交互作用, 根据响应面模型得出在 pH、生物质炭比例、初始磷浓度、初始氟浓度等因素的共同影响下的最优反应条件为: pH 5.0、生物质炭比例 2.9%、初始磷浓度 144.0 mg/kg、初始氟浓度 178.8 mg/kg, 在此条件下模型预测的磷、氟的吸附量分别为 949.6 mg/kg、1 622.0 mg/kg。

关键词: 黄壤; 生物质炭; 磷元素; 氟元素; 竞争吸附

中图分类号: S153.3 **文献标志码:** A

Competitive Adsorption Characteristics of Phosphorus and Fluorine in Yellow Soil of Western Sichuan Under Different Treatment Conditions

YU Zhengyi, XIAO Xinjuan*, XIAO Xinjuan, XIE Nan

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

Abstract: Response surface method was used in this study to analyze the competitive adsorption characteristics of phosphorus (P) and fluorine (F) in yellow soil of western Sichuan under different proportions of biochar, different initial pH, P and F concentrations in order to provide new ideas for soil F fixation and fertilization technology. The results showed that under competition, the effects of different treatment conditions were in the order of initial F concentration > pH > initial P concentration > biochar ratio on P adsorption capacity, and were in the order of initial F concentration > initial P concentration > pH > biochar ratio on F adsorption capacity. Considering the interaction between various factors, the optimal reaction conditions under the combined influences of pH, biochar ratio, initial P and F concentrations obtained by the response surface model were: pH 5.0, biochar ratio was 2.9%, initial P concentration was 144.0 mg/kg, and initial F concentration was 178.8 mg/kg. Under these conditions, the predicted P and F adsorption amounts were 949.6 mg/kg and 1 622.0 mg/kg, respectively.

Key words: Yellow soil; Biochar; Phosphorus; Fluorine; Competitive adsorption

氟元素是人体必需的微量元素之一, 但过量的氟会对人体产生危害^[1-2]。世界卫生组织、国际粮农组织早在 1990 年就将氟列入“人体可能必需但有潜在毒性的微量元素”。人体中的氟主要来自于饮用水和食物, 而大多数地区地下水和食物中的氟主要来源于土壤。由于氟具有高度的生物活性, 即便在氟污染程度不高的地区, 植物也能富集环境中的氟, 使动物和人体通过食物链受到损害。磷是植物生长发育所必需的矿质元素, 也是引起水体富营养化的主要原因之

一。在对农田土壤施肥过程中, 磷肥施用量往往超出作物实际需磷量, 导致土壤磷素逐渐积累并造成含磷量严重超标, 同时也增加了土壤磷素的淋失风险^[3-9]。水体富营养化导致的农业面源污染已经构成当今世界水质恶化的第一大威胁^[10-11]。磷和氟均为非金属元素, 在溶液中形成阴离子, 当土壤中两种离子同时存在时, 将产生竞争吸附。有研究表明, 磷酸根离子和氟离子在共存情况下会因为配位体交换吸附和专性吸附发生竞争吸附, 从而使土壤对两种离子的吸附量

①基金项目: 四川省重点研发项目(2021YFS0279)资助。

* 通讯作者(xiaojianguo@126.com)

作者简介: 于正义(1994—), 女, 重庆荣昌人, 硕士研究生, 主要从事土壤资源利用研究。E-mail: 1435058041@qq.com

下降;同时,有学者认为在土壤胶体表面,一部分吸附点位有利于氟离子的吸附,而另一些吸附点位则可吸附氟离子,又可吸附磷酸根^[12]。

生物质炭是在氧限制环境中碳质生物质热转化生成的残留物,具有高度芳香性^[13-14]。生物质热解生成生物质炭后会形成良好的孔隙结构,有利于作物生长,提高作物产量^[15-16]。生物质炭因其高度芳香化的结构而具有高稳定性,能够长期留存于土壤中,同时生物质炭本身呈碱性,且具有较高的阳离子交换量,可以很好地调节酸性土壤的 pH^[17]。研究表明,生物质炭本身含有大量的磷并且有效性高,输入土壤后可以增加有效磷的含量。生物质炭还可以通过改变土壤中磷的吸附和解吸改变磷的有效性并减少磷流失^[18]。同时,生物质炭可以改变土壤中氟的形态,降低土壤中的氟含量,从而减少氟污染^[19]。

响应面法(response surface methodology, RSM)是一种综合试验设计与数学建模的优化方法,通过对部分代表性的点进行试验,构造一个明确表达的多项式函数以凸显不同因素(因变量)与试验结果(响应值)之间的关系,从而建立连续变量曲面模型,旨在利用数理统计方法中的参数定量地表征各因素及其交互作用对响应值的影响程度并对其进行优化^[20-21]。同传统的单因素或正交试验相比,响应面法具有试验次数少、准确率高、直观性强和预测性好等优点^[22]。本文就响应面法研究川西黄壤磷和氟在不同处理条件下的竞争吸附,以期土壤氟固定和土壤施肥提供新思路。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤为川西黄壤,采用“S”形布点法,取 0~20 cm 耕作层,用四分法进行缩分,剔除石块和根系,过 2 mm 筛,充分混匀。土壤基本理化性质: pH 4.67, 有机质 15.45 g/kg, 全氟 2.03 g/kg, 水溶性氟 607.87 mg/kg, 有效磷 44.58 mg/kg, 砂粒 300 g/kg, 黏粒 380 g/kg, 粉粒 320 g/kg。

供试生物质炭所用原料为茶渣,均来自于蒙山茶地理标志产品保护范围内茶厂。将茶渣去除大颗粒杂质后,风干,用粉碎机粉碎过 2 mm 筛,在马弗炉 500℃下裂解 2 h 制备生物质炭,冷却后过 0.15 mm 筛,装于棕色瓶中待用。

1.2 试验方法

本研究探究黄壤在初始 pH、生物质炭比例、初始磷浓度以及初始氟浓度不同的条件下对磷、氟竞争

吸附能力的影响,响应面模型分析可以有效地对上述不同条件进行优化,筛选最佳试验条件。每个单因素的初步研究是响应面优化的指导范围,基于 Box-Behnken 采样原理,选择磷的吸附量、氟的吸附量的 4 个影响因素: pH、生物质炭比例、初始磷浓度、初始氟浓度,分别记作: x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 , 进行 4 因素 3 水平的多目标响应面分析试验。响应面因素水平和设计见表 1 和表 2。

表 1 响应面因素水平和编码
Table 1 Factor levels and codes of response surface test

水平 编码	pH: x_1	生物质炭比例: x_2 (%)	初始磷浓度: x_3 (mg/kg)	初始氟浓度: x_4 (mg/kg)
-1	5	1	64	50
0	6	2	104.5	125
1	7	3	145	200

表 2 响应面因素设计
Table 2 Design of response surface test

序号	x_1	x_2	x_3	x_4
1	-1	0	1	0
2	1	0	1	0
3	0	1	1	0
4	0	0	1	1
5	-1	0	-1	0
6	0	0	-1	-1
7	1	-1	0	0
8	0	1	0	-1
9	-1	-1	0	0
10	-1	1	0	0
11	0	0	1	-1
12	0	0	0	0
13	1	1	0	0
14	0	0	0	0
15	1	0	0	1
16	0	-1	-1	0
17	0	1	-1	0
18	0	-1	0	-1
19	0	-1	1	0
20	0	1	0	1
21	0	0	0	0
22	-1	0	0	-1
23	1	0	0	-1
24	-1	0	0	1
25	0	-1	0	1
26	0	0	0	0
27	0	0	0	0
28	1	0	-1	0
29	0	0	-1	1

等温吸附的测定：称取过 0.25 mm 筛的土样 2.00 g 于 100 ml 离心管中，其中生物质炭比例、pH、初始磷浓度、初始氟浓度根据表 2 中的响应面试验设计添加后，立即置于振荡机以 200 次/min 频率恒温 (25℃±1℃) 振荡 24 h 后于离心机离心，取其清液测定氟离子含量和磷浓度。

1.3 数据处理

吸附量： $Q=(C_0-C_e) \times V/m$ ，式中： Q 为吸附容量 (mg/g)； C_0 为初始浓度 (mg/L)； C_e 为吸附平衡后的浓度 (mg/L)； V 为初始溶液体积 (L)； m 为所称样品质量 (g)。

用 Microsoft Excel 2016、Design-Expert 10.0.1 等软件进行数据处理。

2 结果与讨论

2.1 响应面试验结果及方差分析

利用 Design-Expert 10.0.1 软件对试验数据进行统计分析，得到表征磷、氟吸附量的二次多项式回归方程：

$$Q_p = 366.72 + 54.6075 x_1 - 8.79847 x_2 + 49.6045 x_3 - 93.8665 x_4 - 144.169 x_1 x_2 - 36.488 x_1 x_3 + 42.5874 x_1 x_4 + 87.7225 x_2 x_3 + 44.877 x_2 x_4 - 15.4377 x_3 x_4 - 26.4736 x_1^2 + 97.7013 x_2^2 + 325.664 x_3^2 + 54.2709 x_4^2 \quad (1)$$

$$Q_F = 1416.96 - 58.0157 x_1 - 31.7645 x_2 + 90.6777 x_3 + 430.683 x_4 - 46.2471 x_1 x_2 - 54.891 x_1 x_3 - 37.3447 x_1 x_4 - 35.2244 x_2 x_3 - 63.5846 x_2 x_4 - 39.0516 x_3 x_4 - 14.1586 x_1^2 + 18.9694 x_2^2 - 118.287 x_3^2 - 252.746 x_4^2 \quad (2)$$

对上述回归方程进行方差分析，结果如表 3 和表 4 所示，其中 F 值可用来检验各变量对响应值影响的显著性高低， F 值越大，则相应变量的影响程度越高。当模型的显著性检验概率 $P < 0.05$ 时，认为该模型具有统计学意义。从表 3 可以看出，试验条件对磷的吸附量影响大小顺序为： $x_4 > x_1 > x_3 > x_2$ 。模型的决定系数 R^2 为 0.972 1，说明模型具有高显著性，同时 $R_{adj}^2 = 0.944 2$ ，模型能够解释试验 94.42% 的响应值变异，且与预测相关系数 R_{pred}^2 接近，说明此试验模型与真实数据拟合程度良好，具有实践指导意义。同理，由表 4 可知，试验条件对氟吸附量影响大小顺序为： $x_4 > x_3 > x_1 > x_2$ ， $R^2 = 0.949 3$ ， $R_{adj}^2 = 0.898 6$ ，模型具有较高拟合优度。由此，可以用上述模型来分析和预测磷、氟吸附量最优提取工艺。

2.2 交互作用对磷吸附量的影响

在初始磷浓度为 104.5 mg/kg、初始氟浓度为 125 mg/kg 时，pH-生物质炭比例交互作用对磷的吸附量影响比较显著。由图 1A 可知，pH-生物质炭

表 3 竞争吸附作用中磷吸附量拟合回归方程的方差分析结果
Table 3 ANOVA results of fitting regression equation for Phosphorus adsorption in competitive adsorption

方差来源	平方和	自由度	方差	F 值	P 值	显著性
回归模型	1 065 000	14	76 067.11	34.85	< 0.000 1	**
x_1	35 783.71	1	35 783.71	16.39	0.001 2	**
x_2	928.96	1	928.96	0.43	0.524 7	
x_3	29 527.26	1	29 527.26	13.53	0.002 5	**
x_4	105 700	1	105 700	48.44	< 0.000 1	**
$x_1 x_2$	83 138.25	1	83 138.25	38.09	< 0.000 1	**
$x_1 x_3$	5 325.49	1	5 325.49	2.44	0.140 6	
$x_1 x_4$	7 254.75	1	7 254.75	3.32	0.089 7	
$x_2 x_3$	30 780.96	1	30 780.96	14.10	0.002 1	**
$x_2 x_4$	8 055.76	1	8 055.76	3.69	0.075 3	
$x_3 x_4$	953.29	1	953.29	0.44	0.519 4	
x_1^2	4 546.07	1	4 546.07	2.08	0.171 0	
x_2^2	61 917.10	1	61 917.10	28.37	0.000 1	**
x_3^2	687 900	1	687 900	315.1	< 0.000 1	**
x_4^2	19 104.81	1	19 104.81	8.75	0.010 4	**
残差	30 557.29	14	2 182.66			
失拟项	27 101.74	10	2 710.17	3.14	0.140 9	N
纯误差	3 455.55	4	863.89			
合计	1 095 000	28				

注： $R^2=0.972 1$ ， $R_{adj}^2=0.944 2$ ， $R_{pred}^2=0.852 6$ ；*表示在 $P < 0.05$ 水平显著，**表示在 $P < 0.01$ 水平极显著；N 表示不显著 $P > 0.05$ 。

表 4 竞争吸附作用中氟吸附量拟合回归方程的方差分析结果
Table 4 ANOVA results of fitting regression equation for fluorine adsorption in competitive adsorption

方差来源	平方和	自由度	方差	F 值	P 值	显著性
回归模型	2 928 000	14	2 928 000	18.72	< 0.000 1	**
x_1	40 389.79	1	40 389.79	3.62	0.078 0	
x_2	12 107.78	1	12 107.78	1.08	0.315 5	
x_3	98 669.36	1	98 669.36	8.83	0.010 1	*
x_4	2 226 000	1	2 226 000	199.24	< 0.000 1	**
$x_1 x_2$	8 555.16	1	8 555.16	0.77	0.396 3	
$x_1 x_3$	12 052.09	1	12 052.09	1.08	0.316 6	
$x_1 x_4$	5 578.50	1	5 578.50	0.50	0.491 4	
$x_2 x_3$	4 963.04	1	4 963.04	0.44	0.515 9	
$x_2 x_4$	16 171.98	1	16 171.98	1.45	0.248 9	
$x_3 x_4$	6 100.11	1	6 100.11	0.55	0.472 2	
x_1^2	1 300.32	1	1 300.32	0.12	0.738 0	
x_2^2	2 334.09	1	2 334.09	0.21	0.654 6	
x_3^2	90 758.22	1	90 758.22	8.12	0.012 8	*
x_4^2	414 400	1	414 400	37.09	< 0.000 1	**
残差	156 400.00	14	11 171.74			
失拟项	146 400.00	10	14 636.57	5.83	0.052 0	N
纯误差	10 038.68	4	2 509.67			
合计	3 085 000.00	28				

注: $R^2=0.949 3$, $R_{\text{adj}}^2=0.898 6$, $R_{\text{pred}}^2=0.721 6$; *表示在 $P<0.05$ 水平显著, **表示在 $P<0.01$ 水平极显著; N 表示不显著 $P>0.05$ 。

比例交互作用对磷的吸附量的影响趋势呈倾斜曲面。以 pH 6 和生物质炭比例 2% 为界, 磷吸附量与各因子相关关系发生转折。当生物质炭比例 $>2\%$ 时, 磷吸附量总体上随着 pH 的升高而降低, 这与张朴等^[23]的研究一致, 即当磷的平衡浓度较大时, 随着生物质炭比例达到 4%, 土壤对磷的吸附量最低; 当生物质炭比例 $<2\%$ 时, 磷吸附量总体上随着 pH 的升高而升高; 当 $\text{pH}<6$ 时, 磷吸附量总体上随着生物质炭比例升高而升高, 这可能是土壤溶液处于酸性条件下, 土壤中铁、铝氧化物表面等次生矿物及其有机胶体表面的某些基团的质子化随着 pH 的增加而增加, 即能够提供较多的阴离子吸附点位, 使土壤对磷的吸附量增加^[24]; 当 $\text{pH}>6$ 时, 磷吸附量总体上随着生物质炭比例升高而降低。因此, 交互作用下磷的吸附量在 pH 5.0、生物质炭比例 3% 或者 pH 7.0、生物质炭比例 1% 时取得极大值, 二者交互作用对磷的吸附量影响比较显著。

在初始磷浓度为 104.5 mg/kg, 生物质炭比例为 2% 时, 图 1B 所示的 pH-初始氟浓度响应曲面较为平缓, 说明 pH-初始氟浓度交互作用对磷的吸附量的影响较小且显著。在 pH 6.0, 初始磷浓度 104.5 mg/kg 时, 图 1C 所示的交互作用曲面整体跨度较小, 生物质炭比

例-初始氟浓度交互作用对磷的吸附量影响不显著。

在生物质炭比例为 2%、初始氟浓度为 125 mg/kg 时, 初始磷浓度在 pH-初始磷浓度交互作用中对磷的吸附量影响较 pH 大, 且贡献也大, 为磷吸附量的敏感影响因子。由图 1D 可知, pH 和初始磷浓度交互作用曲面呈现显著拱形状, 对磷的吸附量的影响表现为: pH 的增加对磷的吸附量影响不显著; 而初始磷浓度增加会引起吸附量先减少后增加, 这有可能是在酸性土壤中, 由于溶液中的磷酸二氢根产生了一种可促进氟吸附的“配位水合基”^[25], 促进了土壤对氟的吸附能力, 由于吸附点位一定, 从而使交互作用下磷的吸附量降低, 随着初始磷浓度的增加, 促进土壤对氟的“配位水合基”的作用低于初始磷浓度对土壤吸附磷的作用, 从而导致土壤对磷的吸附能力增强, 交互作用下磷的吸附量增加。仅考虑二者影响下的磷吸附量优化试验条件集中于初始磷浓度 64 mg/kg/145 mg/kg 水平附近值。在 pH 6.0、初始氟浓度 125 mg/kg 时, 生物质炭比例与初始磷浓度交互作用对磷的吸附量影响显著。从图 1E 可知, 交互曲面纵向跨度较大, 说明生物质炭比例与初始磷浓度交互作用对磷吸附量影响显著。在 pH 6.0、生物质炭比例 2% 时, 初始磷浓度和初始氟浓度的交互作用对磷的吸附量影

响显著。图 1F 所示交互曲面中，磷的吸附量随着初始磷浓度的增加而先减少后增加，初始磷浓度为磷吸附量的敏感因素，在交互作用中的影响较初始氟浓度影响更显著。图 1E、1F 中磷的吸附量都随初始磷浓度的增加而呈现先减后增的趋势，可能与图 1D 中的

“配位水合基”相似。图 1E、1F 中磷的吸附量随着生物质炭比例、初始氟浓度的增加变化不明显，这有可能是因为在图 1E、1F 中初始磷浓度为磷的吸附量的敏感因素，在交互作用中的影响较生物质炭比例、初始氟浓度的影响更显著。

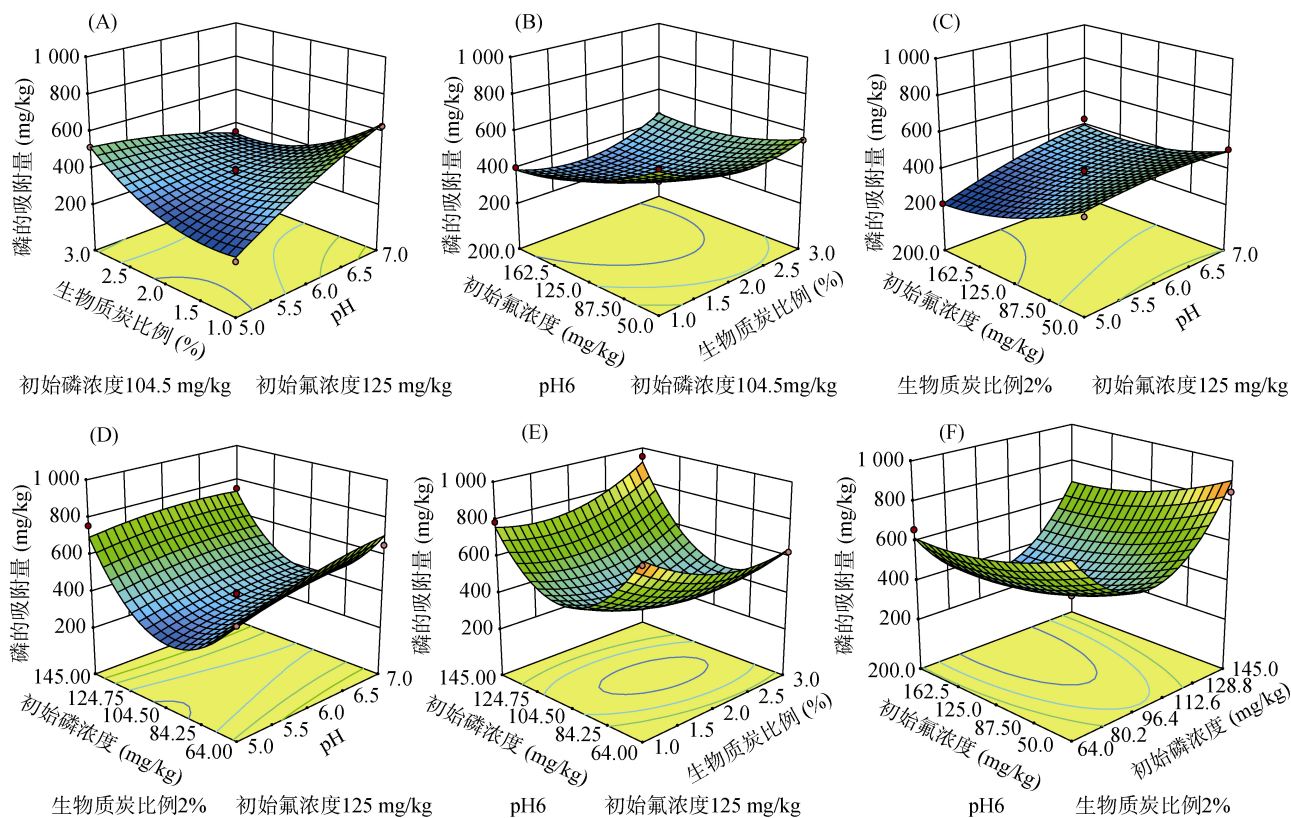


图 1 磷的吸附量随不同因素变化的曲面趋势图

Fig. 1 Surface trend charts of phosphorus adsorption with different factors

2.3 交互作用对氟吸附量的影响

在初始磷浓度为 104.5 mg/kg，初始氟浓度为 125 mg/kg 时，pH-生物质炭比例交互作用对氟吸附量的影响不显著。由图 2A 可知，pH-生物质炭比例交互作用引起曲面较小幅度变化，表明二者交互作用对氟的吸附量的影响不显著；在生物质炭比例 2%、初始氟浓度 125 mg/kg 时，pH-初始磷浓度交互作用对氟的吸附量的影响较小且显著。由图 2B 可知，pH 对氟的吸附量影响接近线性变化，而初始磷浓度增加将导致氟的吸附量增加，对其起促进作用，这有可能是在酸性土壤中磷和氟的竞争吸附时，由于溶液中的磷酸二氢根产生了一种可促进氟吸附的“配位水合基”，从而增加土壤对氟的吸附能力。在 pH 6.0、初始氟浓度 125 mg/kg 时，从图 2C 可知，初始磷浓度-生物质炭比例交互作用对氟的吸附量影响不显著。

在初始磷浓度 104.5 mg/kg、生物质炭比例 2% 时，pH-初始氟浓度交互作用中氟的吸附量受初始氟浓度的影响显著。由图 2D 所示的 pH-初始氟浓度响应曲面中可见，氟的吸附量受 pH 的影响较小且显著。而当 pH 一定时，提高初始氟浓度将极大提升氟的吸附量，因为氟离子的初始浓度越高，溶液中更多的氟离子与吸附点位结合使得吸附容量增加，同时也可能是黄壤中的黏粒含量较多、活性表面积大，对氟离子有强大的吸附作用^[26]。当设置 pH 为 5.0、初始氟浓度为 170 ~ 200 mg/kg 时，为二者交互影响下氟的吸附量的优化试验条件；在 pH 6.0、初始磷浓度 104.5 mg/kg 时，生物质炭比例对磷的吸附量影响不显著，初始氟浓度与氟的吸附量呈正相关关系。图 2E 所示的生物质炭比例-初始氟浓度交互作用与图 2D 所示的交互作用影响类似，生物质炭比例对磷的吸附量影响不显著，初始氟浓度与氟的吸附量呈正相关关系；在 pH

6.0、生物质炭比例 2% 时，初始磷浓度和初始氟浓度的交互作用对氟的吸附量的影响显著。在图 2F 所示交互曲面中，初始磷浓度为磷的吸附量的敏感因素，在交互作用中的影响较初始氟浓度影响更显著。氟的吸附量随初始磷浓度和初始氟浓度的增加均呈现先增后减规律变化，可能因为当溶液中的初始磷浓度较低时，溶液中产生的磷酸二氢根对土壤对氟的吸

附能力起着促进作用，从而增加土壤对氟的吸附能力；当溶液中的初始磷浓度越高，磷和氟离子共存时由于均可以发生配位体交换吸附和专性吸附而存在竞争吸附，导致土壤对氟离子的吸附能力下降，从而导致氟离子的吸附量下降。当设置初始磷浓度取值为 104 ~ 124 mg/kg、初始氟浓度为 180 ~ 200 mg/kg 时，利于提高产物氟的吸附量。

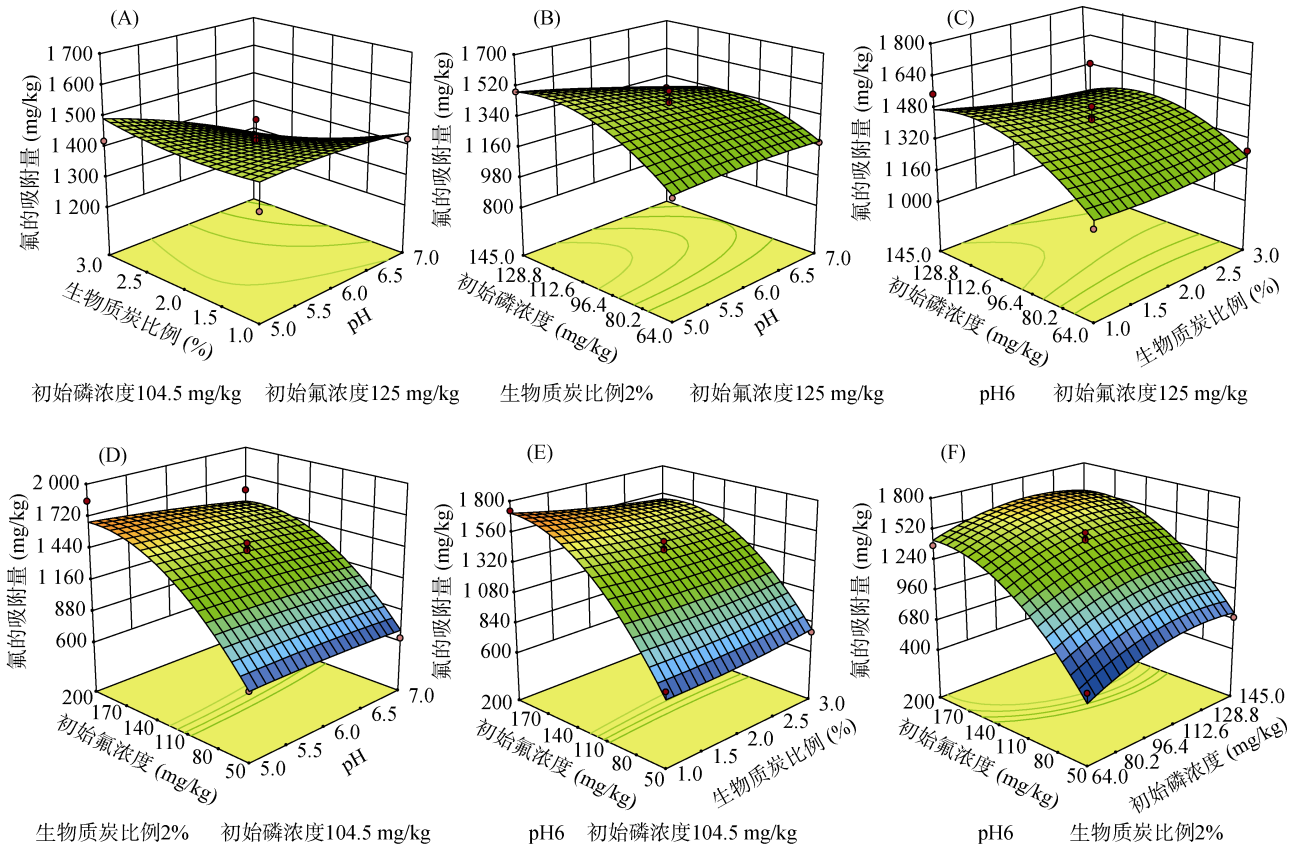


图 2 氟的吸附量随不同因素变化的曲面趋势图
Fig. 2 Surface trend charts of fluorine adsorption with different factors

3 结论

黄壤中不同处理条件对磷的吸附量影响大小顺序为：初始氟浓度>pH>初始磷浓度>生物质炭比例。初始磷浓度和 pH、初始磷浓度和生物质炭比例、初始氟浓度和初始磷浓度的交互作用对磷的吸附量影响显著。不同处理条件对氟的吸附量影响大小顺序为：初始氟浓度>初始磷浓度>pH>生物质炭比例。初始氟浓度和 pH、初始氟浓度和生物质炭比例、初始氟浓度和初始磷浓度的交互作用对黄壤中氟的吸附量影响显著。为协同考虑各因素之间的交互作用对黄壤中磷、氟吸附量的影响，进一步确定全局最优解，以最大化吸附量为优化目标，根据 Design-Expert 10.0.1 软件运行结果，磷的吸附量在 pH、生物质炭

比例、初始磷浓度、初始氟浓度等因素的共同影响下的最优提取工艺为：pH 5.0、生物质炭比例 2.9%、初始磷浓度 144.0 mg/kg、初始氟浓度 178.8 mg/kg，在此条件下模型预测的磷、氟的吸附量分别为 949.6 mg/kg、1 622.0 mg/kg。

参考文献：

[1] 涂成龙, 何令令, 崔丽峰, 等. 氟的环境地球化学行为及其对生态环境的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(1): 21-29.

[2] Li Y P, Wang S L, Nan Z R, et al. Accumulation, fractionation and health risk assessment of fluoride and heavy metals in soil-crop systems in northwest China[J]. Science of the Total Environment, 2019, 663: 307-314.

[3] 贾学萍, 刘勤, 张焕朝. 不同水稻土对磷吸附的影响因素研究[J]. 河南科技学院学报(自然科学版), 2015, 43(4): 7-13.

- [4] 赵闪闪, 王冰, 高云航, 等. 生物质炭对黑土磷吸附-解吸特性的影响[J]. 吉林大学学报(理学版), 2017, 55(1): 181-188.
- [5] 鲁艳红, 廖育林, 聂军, 等. 长期施肥红壤性水稻土磷素演变特征及对磷盈亏的响应[J]. 土壤学报, 2017, 54(6): 1471-1485.
- [6] Jalali M, Jalali M. Assessment risk of phosphorus leaching from calcareous soils using soil test phosphorus[J]. Chemosphere, 2017, 171: 106-117.
- [7] Xi B, Zhai L M, Liu J, et al. Long-term phosphorus accumulation and agronomic and environmental critical phosphorus levels in Haplic Luvisol soil, Northern China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2016, 15(1): 200-208.
- [8] Khan A, Lu G Y, Ayaz M, et al. Phosphorus efficiency, soil phosphorus dynamics and critical phosphorus level under long-term fertilization for single and double cropping systems[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2018, 256: 1-11.
- [9] 申艳, 段英华, 黄绍敏, 等. 潮土 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量对磷肥施用的响应及其淋失风险分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(6): 1689-1696.
- [10] 徐明岗, 孙本华, 张一平. 土壤磷扩散规律及其能量特征的研究 II. 施磷量及水肥温相互作用对磷扩散的影响[J]. 土壤学报, 1998, 35(1): 55-64.
- [11] 段永蕙, 张乃明. 滇池流域农村面源污染状况分析[J]. 环境保护, 2003, 31(7): 28-30.
- [12] 季国亮. 氧化铁对磷酸根和氟离子的竞争吸附[J]. 土壤学报, 1986, 23(3): 220-227.
- [13] Tan X F, Liu S B, Liu Y G, et al. Biochar as potential sustainable precursors for activated carbon production: Multiple applications in environmental protection and energy storage[J]. Bioresource Technology, 2017, 227: 359-372.
- [14] Oliveira F R, Patel A K, Jaisi D P, et al. Environmental application of biochar: Current status and perspectives[J]. Bioresource Technology, 2017, 246: 110-122.
- [15] Laird D A. The charcoal vision: A win-win-win scenario for simultaneously producing bioenergy, permanently sequestering carbon, while improving soil and water quality[J]. Agronomy Journal, 2008, 100(1): 178-181.
- [16] 王怀臣, 冯雷雨, 陈银广. 废物资源化制备生物质炭及其应用的研究进展[J]. 化工进展, 2012, 31(4): 907-914.
- [17] Chintala R, Schumacher T E, McDonald L M, et al. Phosphorus sorption and availability from biochars and soil/biochar mixtures[J]. CLEAN - Soil, Air, Water, 2014, 42(5): 626-634.
- [18] Xu G, Sun J N, Shao H B, et al. Biochar had effects on phosphorus sorption and desorption in three soils with differing acidity[J]. Ecological Engineering, 2014, 62: 54-60.
- [19] 张双燕. 竹炭对废水及土壤中镉、氟的吸附及形态影响研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2015.
- [20] Podstawczyk D, Witek-Krowiak A, Dawiec A, et al. Biosorption of copper(II) ions by flax meal: Empirical modeling and process optimization by response surface methodology (RSM) and artificial neural network (ANN) simulation[J]. Ecological Engineering, 2015, 83: 364-379.
- [21] Chamoli S. ANN and RSM approach for modeling and optimization of designing parameters for a V down perforated baffle roughened rectangular channel[J]. Alexandria Engineering Journal, 2015, 54(3): 429-446.
- [22] Wang J P, Chen Y Z, Wang Y, et al. Optimization of the coagulation-flocculation process for pulp mill wastewater treatment using a combination of uniform design and response surface methodology[J]. Water Research, 2011, 45(17): 5633-5640.
- [23] 张朴, 李仁英, 吴洪生, 等. 水稻秸秆生物质炭对土壤磷吸附影响的研究[J]. 土壤, 2018, 50(2): 264-269.
- [24] 颜晓, 卢志红, 魏宗强, 等. 几种典型酸性旱地土壤磷吸附的关键影响因素[J]. 中国土壤与肥料, 2019(3): 1-7.
- [25] 沈阿林, 姚同山, 李学垣, 等. 花岗岩上发育的几种土壤表面氟、磷、硫的竞争吸附[J]. 华北农学报, 1998, 13(2): 75-81.
- [26] 王昶, 徐永为, 贾青竹, 等. 矿物土壤对氟离子的吸附特性研究[J]. 天津科技大学学报, 2009, 24(6): 30-34.