

# 氮磷水耦合作用下土壤种子库 植被恢复应用参数的优化

赵娜<sup>1</sup>, 贺梦璇<sup>2</sup>, 李洪远<sup>3</sup>, 孟伟庆<sup>2</sup>, 莫训强<sup>2</sup>

(1. 山西省环境科学研究院, 山西 太原 030024; 2. 天津师范大学  
地理与环境科学学院, 天津 300387; 3. 南开大学 环境科学与工程学院, 天津 300350)

**摘要:** [目的] 探究植被恢复工程中氮、磷、水的交互作用对土壤种子库萌发的影响, 可为表层土壤的合理利用以及土壤种子库植被恢复工程中相关参数的调控提供有价值的参考。[方法] 采用温室萌发法, 探讨氮、磷、水分等单一因素对土壤种子库萌发及幼苗初期生长的影响; 采用 Box-Behnken 中心组合设计 (BBC) 与响应面法 (RSM) 相结合的方法来探究这 3 个因素对土壤种子库萌发及幼苗初期生长的交互影响, 并得到植被恢复的最优方案; 采用降维法对响应面模型中 3 因素的耦合作用进行验证。[结果] ①当氮、磷、水分分别位于 5~20 g/m<sup>2</sup>, 5~15 g/m<sup>2</sup>, 10~30 mm 范围时, 土壤种子库的萌发及幼苗初期生长情况相对较好; ②响应面分析中最适模型为二次模型, 在该模型中水分 (C) 对响应值 Y 的影响最大, 且植被恢复的最优条件为氮 13.54 g/m<sup>2</sup>, 磷 9.47 g/m<sup>2</sup>, 水分 30 mm; ③在水分较低的情况下, 植物对氮、磷的吸收也相对较低, 氮、磷、水的交互作用不显著; 而在水分较高的情况下, 即使施肥较少, 其对应的土壤种子库萌发效果也高于施肥水平高而水分胁迫的处理。降维分析进一步验证了水分的重要性, 这与响应面分析中的结果相吻合。[结论] 尽管优化条件可能与实际中略有差异, 但该研究仍有很大的参考价值, 且氮、磷与水的交互效应均表现出对土壤种子库萌发及幼苗生长的促进作用。

**关键词:** 土壤种子库; 氮; 磷; 水分含量; 响应面优化; 降维法

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2019)05-0152-08

中图分类号: S154, Q142.3

**文献参数:** 赵娜, 贺梦璇, 李洪远, 等. 氮磷水耦合作用下土壤种子库植被恢复应用参数的优化[J]. 水土保持通报, 2019, 39(5): 152-159. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2019.05.021; Zhao Na, He Mengxuan, Li Hongyuan, et al. Optimization of application parameters for revegetation of soil seed bank under coupling effects of nitrogen, phosphorus and water content[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(5): 152-159.

## Optimization of Application Parameters for Revegetation of Soil Seed Bank Under Coupling Effects of Nitrogen, Phosphorus and Water Content

Zhao Na<sup>1</sup>, He Mengxuan<sup>2</sup>, Li Hongyuan<sup>3</sup>, Meng Weiqing<sup>2</sup>, Mo Xunqiang<sup>2</sup>

(1. Shanxi Research Academy of Environmental Sciences, Taiyuan, Shanxi 030024, China;

2. College of Geographic and Environment Sciences, Tianjin Normal University, Tianjin 300387,

China; 3. College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China)

**Abstract:** [Objective] The effects and interaction of nitrogen, phosphorus and water on the germination of a soil seed bank in vegetation restoration project were explored in order to provide valuable reference for the judicious utilization of topsoil and the control of key parameters on soil seed bank's vegetation recovery engineering. [Methods] The effect of three factors (nitrogen, phosphorus and water) on soil seed bank's germination and early seedling growth were studied using greenhouse germination experiments. Box-Behnken central composite design (BBC) combined with the response surface methodology (RSM) was used to explore the interaction effect of these three factors on the soil seed bank's germination and early seedling growth,

收稿日期: 2019-04-17

修回日期: 2019-05-09

资助项目: 天津市自然科学基金青年项目“基于土壤种子库技术的长芒苣生物入侵机制及入侵潜力研究”(18JCQNJC78200); 天津市生态环境治理科技重大专项“天津市域生态空间格局优化与生态功能提升技术及应用”(18ZXSZSF00200)。

第一作者: 赵娜(1991—), 女(汉族), 山西省武乡县人, 硕士, 助理工程师, 主要从事植被恢复与生态遥感方面的研究, Email: nku\_zhaona@126.com。

and the optimal scheme of soil seed bank's vegetation restoration was obtained. Finally, the coupling effect of the three factors in the response surface model was verified by the dimension reduction method. [Results] ① With nitrogen, phosphorus and water content in the range of 5~20 g/m<sup>2</sup>, 5~15 g/m<sup>2</sup>, 10~30 mm respectively, the germination effect on the soil seed bank was the best in the single factor experiment; ② The quadratic model was selected in the response surface analysis, and the water had the most important influence on soil seed bank. The optimal conditions for the vegetation recovery was determined to be with levels of nitrogen of 13.54 g/m<sup>2</sup>, phosphorus of 9.47 g/m<sup>2</sup>, and water content of 30 mm respectively; ③ Plant uptake of nitrogen and phosphorus was relatively lower under low water content, in which the interaction of nitrogen, phosphorus and water content was not significant. In the case of higher water content, even if fewer fertilizers were applied, the germination effect on the corresponding soil seed bank was higher than that of the treatment with high fertilizer level but water stress. The water content was determined to be the most important factor in the research by the method of dimension reduction, which was consistent with the result of response surface analysis. [Conclusion] Optimal conditions may slightly different from the actual, but the research still has great reference value, and the interaction effect of nitrogen, phosphorus and water shows the promotion effect on soil seed bank's germination and early seedling growth.

**Keywords: soil seed bank; nitrogen; phosphorus; water content; response surface optimization; dimension reduction method**

土壤种子库(soil seed bank)作为植物群落自然更新的物质基础,已被证实是一种有效的植被恢复方法<sup>[1]</sup>。尽管在不同退化生态系统中,其植被恢复能力存在差异性,但仍是区域生态修复与重建策略制定中的重要依据<sup>[2]</sup>。大量研究表明,土壤种子库的组成和结构决定了地上植物群落的结构和功能<sup>[3-4]</sup>,这种影响在干扰严重的区域更为显著<sup>[5]</sup>,且拥有较大土壤种子库的生态系统在灾变后可更迅速的恢复<sup>[6]</sup>。因此,利用土壤种子库进行自然恢复是退化生态系统恢复和重建的一个主要途径<sup>[7-8]</sup>。但目前国内对土壤种子库的研究主要集中于理论方面<sup>[9]</sup>,关于工程应用参数对其植被恢复方面的研究甚少。

氮、磷、水分是陆地生态系统的常见限制因子<sup>[10]</sup>。其中,氮、磷均是植物生长所必需的大量营养元素,在一定程度上可促进种子的萌发,但过量的养分富集会降低种子的发芽率<sup>[11]</sup>、影响群落结构和功能<sup>[12]</sup>;水分作为限制种子萌发最重要的环境因子之一<sup>[13]</sup>,在干旱半干旱地区,其对土壤种子库的影响远比光照、温度、海拔等环境因子大<sup>[14]</sup>。此外,在农林业的实际生产中,通常采用灌溉和施肥来满足农作物或植物的生长需求,但是单纯的灌溉或施肥往往不能大幅度改善林木的生长状况。研究表明,水肥耦合效应可以提高水分和肥料的利用效率,防止肥料流失造成的土壤和水体污染<sup>[15-16]</sup>。目前,国内外对水肥耦合的研究主要集中于农作物<sup>[17]</sup>,对植被恢复过程中水肥耦合效应的研究尚不多见。

基于上述原因,并充分考虑表土采集地植物的主要限制因子,天津市春季干旱少雨以及所选因素在实

际工程应用中易控制等情况,选择氮、磷、水分作为主要的研究因素。该研究采用温室萌发法,探讨了氮、磷、水分等单因素对土壤种子库萌发的影响,并从中选取萌发效果较好的水平范围,采用 Design-Expert 8.0.5b 软件设计响应面优化试验,探究这 3 个工程因素对土壤种子库影响的交互作用,进而得到土壤种子库用于植被恢复的最优方案,为今后天津滨海盐碱地植被恢复及类似的城市绿地植被恢复方案的探索提供借鉴。

## 1 材料与方 法

### 1.1 表土采集地概况

通过研究室前期对天津地区土壤种子库资源的统计分析<sup>[18]</sup>,发现官港森林公园表层土壤中活性种子的储量较高,且该地土壤种子库中木本植物的萌发数量处于较高水平,因此选择该地为表土采集地。

天津官港森林公园(117.32°E,38.56°N)位于天津市滨海新区大港北部,属于大陆性季风气候,并具有海洋性气候特点。年平均气温 13.0℃,年平均降水量 566.0 mm,但降水随季节变化显著,主要集中在夏季(约占总量的 75%)。该地土壤母质为海相沉积物上覆盖河流沉积物,土壤类型以滨海盐土和盐化湿潮土为主,已有研究表明<sup>[19]</sup>滨海新区 0—20 cm 土壤全盐平均含量为 0.818%,土壤 pH 值平均值为 8.43,偏碱性。该地植物以白蜡(*Fraxinus chinensis*)、桑(*Morus alba*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、藜(*Chenopodium album*)、碱蓬(*Suaeda glauca*)、大刺儿菜(*Cirsium setosum*)等居多。

## 1.2 取样方法

本研究分别于 2015 年 11 月中旬与 2016 年 3 月初,在表土采样地选择了 3 个面积为 20 m×20 m 的样地(两次表土的取样均选在同一采样地,分别用于单因素试验和响应面优化试验中)。采样时,在每个样地随机选择了 20 个面积为 1 m×1 m 的样方,于每个样方的中心和 4 个角处采集 0—10 cm 的表层土壤,仔细去掉样品中的砂石、枯枝落叶等杂质后,将 300 个土样混合均匀后全部装进塑料袋封口并带回实验室。同时记录表土采样地 3 个样地的地表植被群落状况,主要包括植物物种组成、数量等指标。

## 1.3 土壤种子库萌发试验

单因素试验方案见表 1。参考天津滨海地区氮、磷肥的使用情况以及王国栋<sup>[20]</sup>的研究,选用尿素(CN<sub>2</sub>H<sub>4</sub>)、磷酸二氢钠(NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O)分别为模拟氮肥、磷肥,并设置 5 个施肥水平和一组共同的空白对照试验(即不添加任何氮、磷肥)。为了尽量减少氮、磷肥的损失,施肥一次完成,并将氮、磷肥分别溶解于适量水中制成溶液,使用洒水壶均匀的喷洒在试验萌发盘中,共同对照组则喷洒等量的水;水分梯度的设置则是参考李淑君等<sup>[21]</sup>的研究成果,并充分考虑到天津滨海地区春季干旱少雨的特点,设置模拟自然降雨量的梯度为 3, 5, 10, 20, 30 mm,并根据萌发盘的底面积折算成实际的浇水量。单因素萌发试验的时间为 2015 年 11 月 25 日至 2016 年 2 月底。试验开始时,将全部表土(2015 年 11 月中旬采集)再次混合均匀,然后铺设成 5 cm 厚的苗床,其中萌发盘大小为 50 cm×20 cm×5 cm,故每个萌发盘中表土用量为 5 000 cm<sup>3</sup>。萌发试验期间,温室内温度保持 25 ℃~35 ℃,相对湿度为 50%~70%,并于每 3 d 的 18:00 点按试验设计的水分梯度进行浇水,同时记录土壤种子库萌发的种类、数量等数据。

根据单因素试验的结果,选取萌发效果较好的因素水平范围,即分别以 5~20 g/m<sup>2</sup>(氮肥),5~15 g/m<sup>2</sup>(磷肥),10~30 mm(水分)为 Box-Behnken 中心组合设计的上下限,进行响应面优化试验的设计(见表 2)。响应面优化试验时间为 2016 年 3 月 4 日至 5 月底,试验开始时,同样将全部表土(2016 年 3 月初采集)再次混合均匀,然后参考日本学者的研究结果<sup>[22-23]</sup>及研究室前期的试验基础<sup>[9]</sup>,将草炭与珍珠岩混合基质(体积比 1:1)与表土按 35%的比例混合均匀,并铺设成 5 cm 厚的苗床,故每个萌发盘中表土用量为 3 250 cm<sup>3</sup>,草炭和珍珠岩用量均为 875 cm<sup>3</sup>。萌发试验期间,与单因素萌发试验保持相同的试验条件与操作,其中氮、磷肥的施用于试验初期进行一次性施肥。

表 1 单因素试验的方案设计

| 参 数                          | 水 平 |     |     |       |       |
|------------------------------|-----|-----|-----|-------|-------|
|                              | 1   | 2   | 3   | 4     | 5     |
| A(氮素添加)/(g·m <sup>-2</sup> ) | 5   | 10  | 20  | 30    | 40    |
| B(磷素添加)/(g·m <sup>-2</sup> ) | 2   | 5   | 10  | 15    | 20    |
| C(水分梯度)/ml                   | 150 | 250 | 500 | 1 000 | 1 500 |

表 2 响应面法的试验设计与方案

| 运行顺序 | 编码值 |    |    | 响应值   |
|------|-----|----|----|-------|
|      | A   | B  | C  | Y     |
| 1    | -1  | -1 | 0  | 0.439 |
| 2    | 1   | -1 | 0  | 0.140 |
| 3    | -1  | 1  | 0  | 0.269 |
| 4    | 1   | 1  | 0  | 0.650 |
| 5    | -1  | 0  | -1 | 0.191 |
| 6    | 1   | 0  | -1 | 0.269 |
| 7    | -1  | 0  | 1  | 0.491 |
| 8    | 1   | 0  | 1  | 0.708 |
| 9    | 0   | -1 | -1 | 0.215 |
| 10   | 0   | 1  | -1 | 0.479 |
| 11   | 0   | -1 | 1  | 0.788 |
| 12   | 0   | 1  | 1  | 0.635 |
| 13   | 0   | 0  | 0  | 0.661 |
| 14   | 0   | 0  | 0  | 0.707 |
| 15   | 0   | 0  | 0  | 0.685 |
| 16   | 0   | 0  | 0  | 0.759 |
| 17   | 0   | 0  | 0  | 0.785 |

## 1.4 数据处理

采用 Excel 软件进行数据的统计和处理,采用 SPSS 21.0 软件进行土壤种子库萌发特征指标的主成分分析(PCA),采用 Design-Expert 8.0.5b 软件进行响应面优化试验的方案设计和响应面分析。此外,土壤种子库试验中萌发物种多样性指数的计算公式如下:

Shannon-Wiener 多样性指数:

$$H = - \sum_{i=1}^s (P_i \times \ln P_i) \quad (1)$$

Simpson 优势度指数:

$$D = 1 - \sum_{i=1}^s P_i^2 \quad (2)$$

Pielou 均匀度指数:

$$E = \frac{H}{\ln S} \quad (3)$$

式中: S——各萌发盘中植物萌发的总物种数; P<sub>i</sub>——第 i 种植物萌发的个体数占种子库总萌发个体数的比例(%)。

## 2 结果与分析

### 2.1 氮、磷、水分等单因素对土壤种子库萌发及幼苗初期生长的影响

热点图可以图示化离散数据的分布及其相互关系,深色代表事件发生频率较高或事物分布密度较

大,浅色反之。该研究以土壤种子库萌发幼苗总数( $X_1$ )、物种数( $X_2$ )、木本数量( $X_3$ )、草本植物的地上生物量( $X_4$ )、木本植物的平均高度( $X_5$ )和平均冠幅( $X_6$ )、Shannon-Wiener 多样性指数( $X_7$ )、Simpson 优势度指数( $X_8$ )、Pielou 均匀度指数( $X_9$ )等 9 个指标,来分析氮、磷、水分等单因素对土壤种子库萌发及幼苗初期生长的影响。图 1 为单因素试验的热点图,从图中可以看出在  $N_5-N_{20}$ ,  $P_5-P_{15}$ ,  $W_{10}-W_{30}$  时,各指标( $X_1-X_9$ )对应的颜色含深色较多,即在氮、磷、水分单因素试验中,当氮、磷、水分分别位于  $5\sim 20\text{ g/m}^2$ ,  $5\sim 15\text{ g/m}^2$ ,  $10\sim 30\text{ mm}$  范围时,土壤种子库的萌发及幼苗初期生长效果相对较好,可用作 Box-Behnken 中心组合设计的上下限,进行响应面优化试验的设计。

### 2.2 土壤种子库萌发各指标的主成分分析(PCA)

采用抽取法和 Kaiser 标准化的四分旋转法对土壤种子库萌发中的 9 个指标进行 PCA 分析,结果如表 3 所示。从表 3 中可以看出前 2 个成分的特征值较大,分别为 4.075 和 2.373,且二者的累积贡献率达到 71.639%,因此这两个成分( $Y_1$  和  $Y_2$ )的提取可以近似代表所有的指标。根据提取后各成分的系数

(表 4)可计算出  $Y_1$  和  $Y_2$  的值,然后以  $Y_1$  和  $Y_2$  解释量所占的比例计算出的值为响应值  $Y$ (即  $Y=Y_1\times 0.632\ 0+Y_2\times 0.368\ 0$ ),用于进一步的响应面优化分析。

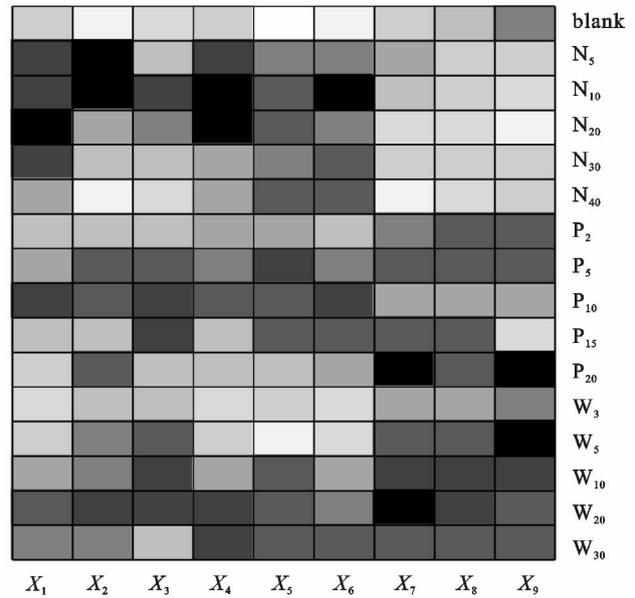


图 1 单因素试验的热点图

表 3 主成分的统计信息结果

| 成分 | 初始特征值 |        |         | 提取平方和载入 |        |        | 旋转平方和载入 |        |        |
|----|-------|--------|---------|---------|--------|--------|---------|--------|--------|
|    | 合计    | 方差/%   | 累积/%    | 合计      | 方差/%   | 累积/%   | 合计      | 方差/%   | 累积/%   |
| 1  | 4.075 | 45.278 | 45.278  | 4.075   | 45.278 | 45.278 | 4.074   | 45.262 | 45.262 |
| 2  | 2.373 | 26.361 | 71.639  | 2.373   | 26.361 | 71.639 | 2.374   | 26.377 | 71.639 |
| 3  | 0.973 | 10.814 | 82.453  |         |        |        |         |        |        |
| 4  | 0.75  | 8.329  | 90.782  |         |        |        |         |        |        |
| 5  | 0.473 | 5.256  | 96.038  |         |        |        |         |        |        |
| 6  | 0.275 | 3.053  | 99.091  |         |        |        |         |        |        |
| 7  | 0.052 | 0.576  | 99.667  |         |        |        |         |        |        |
| 8  | 0.028 | 0.311  | 99.978  |         |        |        |         |        |        |
| 9  | 0.002 | 0.022  | 100.000 |         |        |        |         |        |        |

表 4 各成分的系数矩阵

| 指标                   | 成分     |        |
|----------------------|--------|--------|
|                      | 1      | 2      |
| 萌发幼苗总数               | 0.033  | 0.382  |
| 萌发物种数                | 0.154  | 0.226  |
| 萌发木本的数量              | -0.057 | 0.379  |
| 草本植物的地上生物量           | 0.174  | 0.094  |
| 木本植物的平均高度            | 0.196  | -0.124 |
| 木本植物的平均冠幅            | 0.144  | -0.127 |
| Shannon-Wiener 多样性指数 | 0.232  | 0.108  |
| Simpson 优势度指数        | 0.22   | 0.032  |
| Pielou 均匀度指数         | 0.161  | -0.166 |

### 2.3 基于 PCA 结果的响应面分析

以氮(A)、磷(B)、水分(C)为响应面分析的 3 因

素,主成分分析结果中的  $Y$  为响应值(表 2),进行多项式回归分析,其建议的模型为二次回归方程。由方差(ANOVA)分析的结果(表 5)可知,回归模型极其显著( $p=0.000\ 1$ ),模型的失拟项( $p=0.335\ 2>0.05$ )无显著性差异,说明该模型用来模拟试验分析是可行的,且其拟合度良好。在回归模型系数中, $A, B, C, AB, BC, A^2, B^2, C^2$  等均较为显著,表明各因素对响应值的影响不是简单的线性关系,这与推荐模型为二次回归方程相吻合,且在所选因素的水平范围内,对响应值的影响为  $C$ (水分) $>B$ (磷) $>A$ (氮)。此外,响应值对编码自变量  $A, B, C$  的二次响应面回归模型为: $Y=+0.72+0.047A+0.056B+0.18C+0.17AB+0.035AC-0.10BC-0.23A^2-0.12B^2-0.075C^2$ 。

表 5 响应面二次模型的方差分析

| 来源             | 平方和        | 自由度 | 均方         | F 值   | p 值      |
|----------------|------------|-----|------------|-------|----------|
| 模型             | 0.81       | 9   | 0.090      | 27.39 | 0.000 1  |
| A-A            | 0.018      | 1   | 0.018      | 5.44  | 0.052 5  |
| B-B            | 0.025      | 1   | 0.025      | 7.79  | 0.026 9  |
| C-C            | 0.27       | 1   | 0.27       | 82.58 | <0.000 1 |
| AB             | 0.12       | 1   | 0.12       | 35.46 | 0.000 6  |
| AC             | 4.840E-003 | 1   | 4.840E-003 | 1.48  | 0.263 2  |
| BC             | 0.043      | 1   | 0.043      | 13.28 | 0.018 0  |
| A <sup>2</sup> | 0.22       | 1   | 0.22       | 68.07 | <0.000 1 |
| B <sup>2</sup> | 0.056      | 1   | 0.056      | 17.07 | 0.004 4  |
| C <sup>2</sup> | 0.024      | 1   | 0.024      | 7.23  | 0.031 1  |
| 残差             | 0.023      | 7   | 3.271E-003 |       |          |
| 失拟项            | 0.012      | 3   | 4.086E-003 | 1.54  | 0.335 2  |

## 2.4 响应面 3D 效果图和等高线图

响应面图是根据所选取的回归方程绘制的(图 2—7),可以确定各变量间的交互关系,也可以预测和检验各变量的响应值。由图 2—3 可知,A,B 的交互作用较强,编码值 A,B 过大或过小时,均会引起响应值的减小,说明适量的氮、磷添加有利于土壤种子库植被恢复,但过量的氮、磷富集反而延迟种子的萌发,并对幼苗产生不利影响,导致响应值的降低;A,C 的交互作用不大,在编码值为 0 以上的 C 在 A 的较大范围内都能达到较大响应值(图 4—5),说明 C(水分)对响应值的影响较大,这与 ANOVA 分析中的结果相吻合;图 6—7 中表明 B,C 的交互作用也较强,且在编码值为 0 以上的 C 在 B 的绝大部分范围内都能达到较大响应值,与图 4—5 呈现出相同的结果。进一步对各参数优化分析,得到使响应值最大的最优条件为:氮 13.54g/m<sup>2</sup>,磷 9.47g/m<sup>2</sup>,水分 30 mm,对应的理论最优响应值为 0.836,即在此条件下利用土壤种子库进行植被恢复的效果最好。

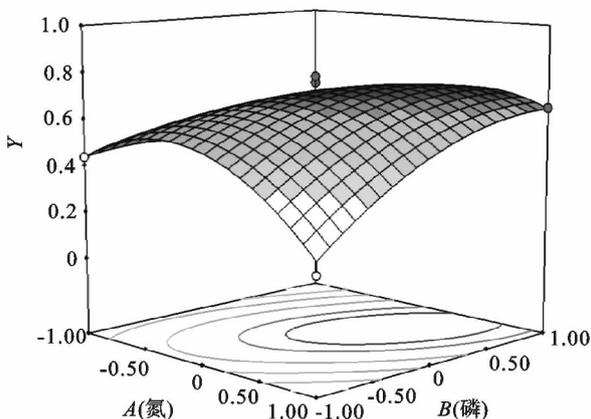


图 2 氮(A)与磷(B)相互作用的响应面图

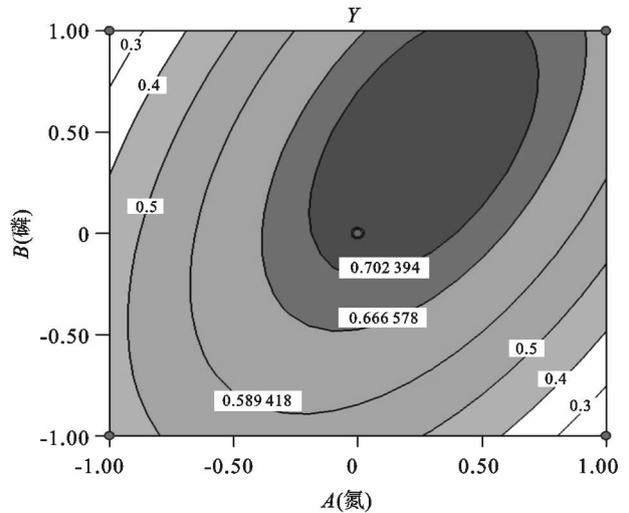


图 3 氮(A)与磷(B)相互作用的等高线分析

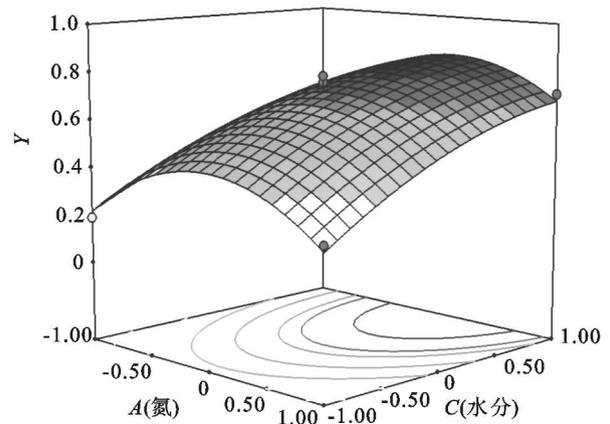


图 4 氮(A)与水分(C)相互作用的响应面图

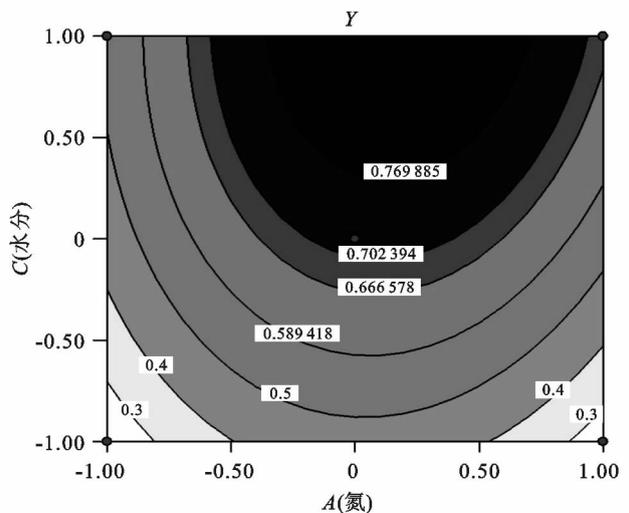


图 5 氮(A)与水分(C)相互作用的等高线分析

## 2.5 响应面回归模型的解析

根据回归模型中各系数的显著性,剔除回归方程中不显著的因素(即 AC 项, $P>0.1$ ),得  $Y = +0.72$

$+0.047A+0.056B+0.18C+0.17AB-0.10BC-0.23A^2-0.12B^2-0.075C^2$ 。为了更直观的找出氮、磷、水因素对响应值  $Y$  的影响效应,采用降维法分析各因素与响应值的关系。

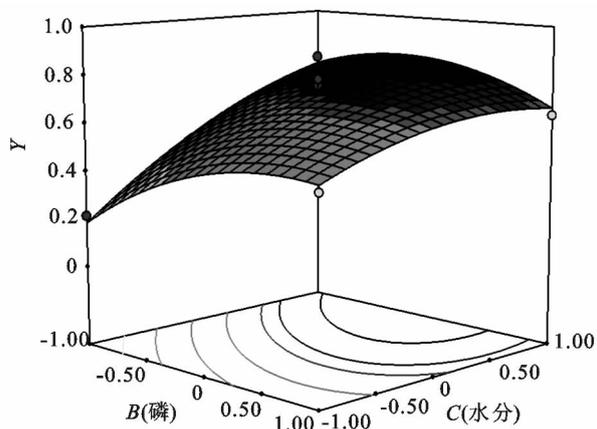


图 6 磷(B)与水分(C)相互作用的响应面图

(1) 氮对响应值的影响。令  $B=C=-1, B=C=0, B=C=1$ , 代入剔除非显著项后的回归方程, 得:  $Y_{N1}=0.189-0.093A-0.23A^2$ ;  $Y_{N2}=0.72+0.047A-0.23A^2$ ;  $Y_{N3}=0.661+0.217A-0.23A^2$ 。将上式的关系绘图(图 8), 发现不论将施磷量和水分梯度固定在高值还是低值, 施氮量对响应值的影响均呈抛

物线状。图中各抛物线的顶点是相应施氮量水平对应的最大响应值增量, 表明施氮量过高或过低都不利于响应值的增大, 只有施氮量达到一定水平(分别为 10.98, 13.27, 16.04  $g/m^2$  时), 响应值达最大值(0.198, 0.722, 0.712)。此时, 在相同的施氮水平上, 施磷量和水分较高时, 响应值也相对较高, 表明施磷量、水分较高时可以促进响应值的增大; 并且当施磷量和水分较低时, 过大的施氮量反而会对响应值造成显著的负面影响。

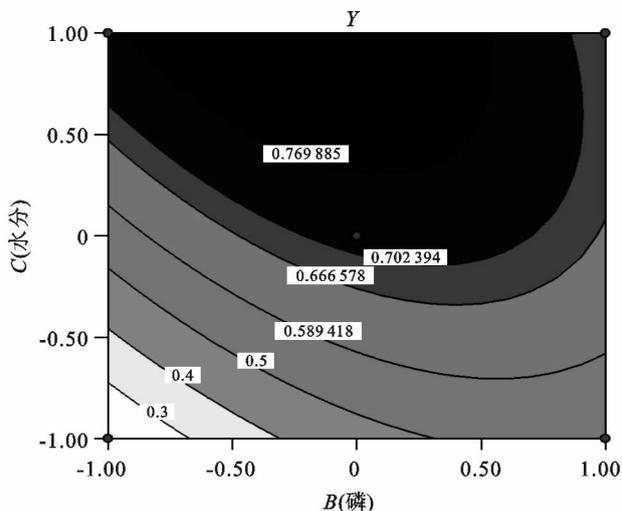


图 7 磷(B)与水分(C)相互作用的等高线分析

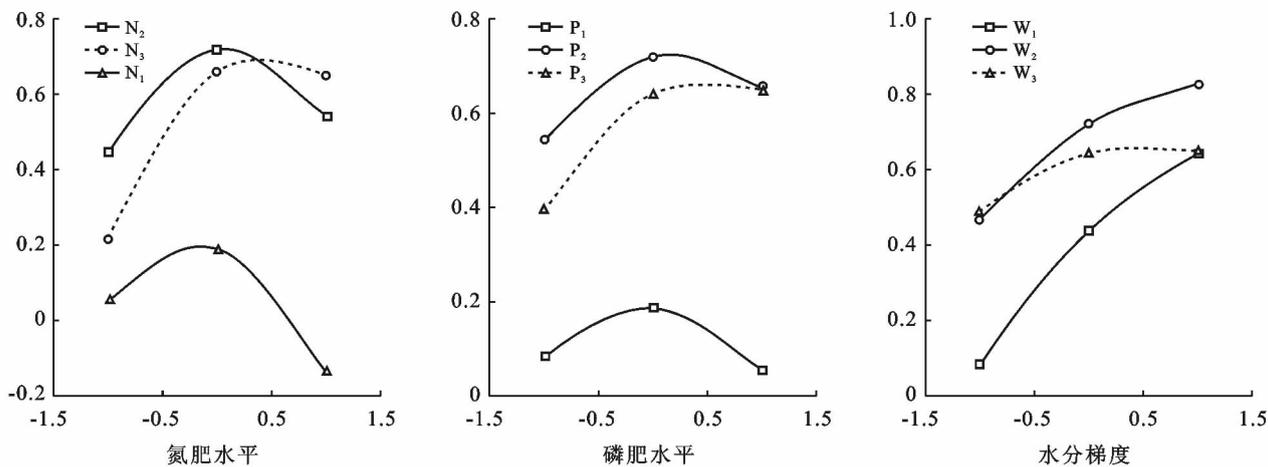


图 8 氮(A)、磷(B)、水分(C)对响应值 Y 的影响

(2) 磷对响应值  $Y$  的影响。令  $A=C=-1, A=C=0, A=C=1$ , 代入得:  $Y_{P1}=0.188-0.014B-0.12B^2$ ;  $Y_{P2}=0.72+0.056B-0.12B^2$ ;  $Y_{P3}=0.642+0.126B-0.12B^2$ 。由图 5 可看出, 3 条曲线也均呈抛物线状, 即水、氮固定在一定水平时, 适当增施磷肥有利于增大响应值。在不同施氮、水分条件下, 随施磷水平的不同(分别为 9.71, 11.17, 12.63  $g/m^2$  时),

响应值的最大值分别为 0.188, 0.727, 0.675。当施氮量、水分固定在低水平时, 响应值受施磷量的影响相对较小; 当施氮量、水分固定在高水平时, 随施磷量的适量增加, 响应值明显增加。此外, 不论氮、水分固定在何种水平, 当磷处于较高水平时, 其对响应值的负面影响比氮小。

(3) 水分对响应值  $Y$  的影响。令  $A=B=-1, A$

$=B=0, A=B=1$ , 代入得:  $Y_{w_1} = 0.437 + 0.28C - 0.075C^2$ ;  $Y_{w_2} = 0.72 + 0.18C - 0.075C^2$ ;  $Y_{w_3} = 0.643 + 0.08C - 0.075C^2$ 。由图 8 可看出, 3 条曲线均为上升曲线, 且走向基本相似, 表明不论氮、磷固定在何种水平, 水分对响应值的影响趋势基本一致, 即响应值随水分的增加而增加; 但当氮、磷固定在高水平时, 水分对响应值的促进作用相对较小。当水分梯度为 30, 30, 20.12 mm 时, 配合不同的施肥水平, 能获得最大响应值, 分别为 0.642, 0.825, 0.644。此时, 当氮、磷固定在低、中水平时, 要想使得响应值最大, 水分需处在较高水平; 当氮、磷固定在高水平时, 水分需求可降低, 且在相同的水分梯度上, 氮、磷肥施用水平固定在中间水平时, 响应值相对较高。

### 3 讨论

植被恢复工程是一个复杂的问题, 至今为止, 针对不同退化类型的植被恢复技术还没有建立<sup>[24]</sup>, 因此对植被恢复工程应用参数的研究很有意义。单因素萌发试验中, 当氮、磷、水分分别位于 5~20 g/m<sup>2</sup> (中低水平)、5~15 g/m<sup>2</sup> (中水平)、10~30 mm (中偏高水平) 范围时, 土壤种子库的萌发及幼苗初期生长效果较好, 这说明适量的施肥有利于种子的萌发及幼苗的生长, 这与前人的研究结果一致<sup>[25-26]</sup>。但在实际生产中, 单纯的灌溉或施肥往往达不到理想的效果, 因此该研究进一步探讨了植被恢复工程中氮、磷、水分等因素的交互作用以及各参数的选取问题。研究结果显示, 二次响应面回归模型 ( $P=0.0001$ ) 可以很好的反应氮 (A)、磷 (B)、水分 (C) 对土壤种子库萌发的交互作用, 该模型中氮 (A) 与磷 (B)、磷 (B) 与水分 (C) 的交互作用较强, 这是因为肥料养分在土壤中的转化过程往往受到其他肥料养分施用的直接或间接影响<sup>[27]</sup>, 如磷肥的添加会影响土壤中铵的固定<sup>[28]</sup>及尿素的水解<sup>[29]</sup>等; 并且有研究表明, 施磷肥能促进植物更好的吸收利用土壤中的水分<sup>[30-31]</sup>; 而氮 (A) 与水分 (C) 交互作用不大可能与该区植物生长的限制因子为磷素有关, 再加上氮肥的最终产物是以硝态氮为主, 而硝态氮容易因淋洗而向下运动<sup>[32]</sup>, 而供试土壤仅 5 cm 厚, 植物的根系也多分布在该土壤层中, 因此造成了该研究中氮、水交互作用不显著的现象。此外, 在所选取的各因素水平范围内, 水分 (C) 对模型中响应值  $Y$  的影响最大, 一方面可能与试验中水分梯度的设置有关, 由于研究考虑到天津滨海新区春季干旱少雨的特点, 因此部分试验处于水分胁迫状态, 而在这种状态下水分对土壤种子库的激发效应远比其他

环境因子影响力大<sup>[21,33]</sup>; 另一方面, 水分的有效性影响着整个土壤的物理化学过程和微生物、植物的生理生化过程<sup>[34]</sup>, 并且养分从土壤向根系表面移动及根吸收的营养物质在植物体内的运转均受水分大小的影响<sup>[30]</sup>。

本试验中对响应面模型的降维法分析表明, 氮、磷与水分的交互效应都表现出对土壤种子库萌发及幼苗生长的促进作用, 说明适宜的水分供应可以促进肥料转化及吸收<sup>[35]</sup>, 提高肥料利用率; 适宜的施肥也可以提高土壤水势和土壤水分的有效性<sup>[30]</sup>, 从而使植物能吸收利用更多的水分, 达到以肥促水的效果。这与前人研究结果基本吻合<sup>[31,36-37]</sup>。通过该方法分析还发现, 在水分较低的情况下, 植物对氮、磷的吸收也相对较低, 这主要是由于干旱降低了植物根系的生长, 进而降低了养分的吸收和运输<sup>[38]</sup>, 此时水分处于胁迫地位, 起到决定性作用, 氮、磷、水的交互作用不显著, 这与张秋英等<sup>[31]</sup>的研究结果基本吻合; 在水分较高的情况下, 即使施肥较少的处理其响应值  $Y$  也高于施肥水平高而水分胁迫的处理, 说明该区种子的萌发和幼苗的生长更多的依赖于水分的作用, 这与 ANOVA 分析中水分 (C) 的显著性最高相一致。

在植物生长过程中, 氮、磷、水各要素的交互作用类型不是固定不变的, 可以通过增加某一种生产要素使因素间的交互作用向更有利的方向转变<sup>[31]</sup>。因此, 研究土壤种子库萌发过程中氮、磷、水的交互作用对于指导植被恢复工程参数的优化、促进植被恢复的效果具有重要意义。目前中国开展了许多退化生态系统植被恢复的项目, 但对植被恢复工程应用关键参数的研究却很少。该研究采用的响应面回归模型效果显著, 可对植被恢复的初期效果进行分析和预测, 尽管优化条件可能与实际中略有差异, 但仍有很大的参考价值, 可为植被恢复过程中氮、磷、水分等因素的调控提供有价值的参考。

### 4 结论

以氮 (A)、磷 (B)、水分 (C) 为响应面分析的 3 因素进行多项式回归分析, 建议的模型为二次回归方程 ( $p=0.0001$ ), 方程为:  $Y = +0.72 + 0.047A + 0.056B + 0.18C + 0.17AB + 0.035AC - 0.10BC - 0.23A^2 - 0.12B^2 - 0.075C^2$ , 3 因素对响应值 ( $Y$ ) 的影响程度为  $C(\text{水分}) > B(\text{磷}) > A(\text{氮})$ , 且土壤种子库植被恢复效果最好的参数为氮 13.54 g/m<sup>2</sup>, 磷 9.47 g/m<sup>2</sup>, 水分 30 mm。氮、磷与水分的交互效应都表现出对土壤种子库萌发及幼苗生长的促进作用, 而该区种子的萌

发和幼苗的生长更多的依赖于水分的作用,在水分较低的情况下,植物对氮、磷的吸收也相对较低,氮、磷、水的交互作用不显著;随着水分的增高,适宜的水分供应可以促进氮、磷肥料的转化及吸收,达到以水促肥的效果。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] Zedler J B. Progress in wetland restoration ecology[J]. Trends in Ecology & Evolution, 2000,15(10):402-407.
- [2] 张雪,董文婧,申仕康,等. 湖滨带土壤种子库研究进展[J]. 湿地科学,2016,14(1):97-102.
- [3] 于顺利,蒋高明. 土壤种子库的研究进展及若干研究热点[J]. 植物生态学报,2003,27(4):552-560.
- [4] 张森,陈芳清,王娅傲,等. 不同植物恢复模式下香溪河消落带土壤种子库特征及其对水位消涨的响应[J]. 湿地科学,2016,14(2):194-200.
- [5] 刘贵华,肖藏,陈漱飞,等. 土壤种子库在长江中下游湿地恢复与生物多样性保护中的作用[J]. 自然科学进展,2007,17(6):741-747.
- [6] Johnson E A. Buried seed populations in the subarctic forest east of Great Slave Lake, Northwest Territories [J]. Canadian Journal of Botany, 1975,53(24):2933-2941.
- [7] 李生,姚小华,任华东,等. 黔中石漠化地区不同土地利用方式土壤种子库研究[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2008,32(1):33-37.
- [8] Leck M, Parker V, Simpson R. Ecology of soil seed banks[M]. San Diego: Academic Press, 1989.
- [9] He Mengxuan, Lv Linyue, Li Hongyuan, et al. Analysis on soil seed bank diversity characteristics and its relation with soil physical and chemical properties after substrate addition[J]. PLoS One, 2016,11(1):e0147439.
- [10] 魏金明,姜勇,符明明,等. 水、肥添加对内蒙古典型草原土壤碳、氮、磷及 pH 的影响[J]. 生态学杂志,2011,30(8):1642-1646.
- [11] Dalton R L, Carpenter D J, Boutin C, et al. Factors affecting soil seed banks of riparian communities in an agricultural ecosystem: Potential for conservation of native plant diversity[J]. Applied Vegetation Science, 2017,20(3):446-458.
- [12] Miao Renhui, Song Yongheng, Sun Zhaolin, et al. Soil seed bank and plant community development in passive restoration of degraded sandy Grasslands[J]. Sustainability, 2016,8(6):581.
- [13] 徐海量,叶茂,李吉枚,等. 不同水分供应对塔里木河下游土壤种子库种子萌发的影响[J]. 干旱区地理,2008,31(5):650-658.
- [14] 赵丽娅,李锋瑞,王先之. 草地沙化过程地上植被与土壤种子库变化特征[J]. 生态学报,2003,23(9):1745-1756.
- [15] Bronson K F, Booker J D, Bordovsky J P, et al. Site-specific irrigation and nitrogen management for cotton production in the southern high plains[J]. Agronomy Journal, 2006,98(1):212-219.
- [16] Singh B, Singh G. Effects of controlled irrigation on water potential, nitrogen uptake and biomass production in Dalbergia sissoo seedlings[J]. Environmental and Experimental Botany, 2006,55(1/2):209-219.
- [17] Cabello M J, Castellanos M T, Romojaro F, et al. Yield and quality of melon grown under different irrigation and nitrogen rates[J]. Agricultural Water Management, 2009,96(5):866-874.
- [18] 莫训强. 土壤种子库应用于滨海地区植被恢复的研究[D]. 天津:南开大学,2013.
- [19] 廉晓娟,李明悦,王艳,等. 基于 GIS 的天津滨海新区土壤盐渍化空间分布研究[J]. 安徽农业科学,2012,40(5):2746-2748,2751.
- [20] 王国栋. 农业活动对三江平原湿地土壤种子库的影响研究[D]. 吉林 长春:中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所),2014.
- [21] 李淑君,李国旗,王磊,等. 不同水分梯度对激发土壤种子库的效应研究[J]. 北方园艺,2014(18):181-185.
- [22] Obata H, Hoshizawa Y. A case study on the spraying revegetation method using topsoil seedbank (Ⅷ)[J]. Journal of the Japanese Society of Revegetation Technology, 2008,34(3):534-537.
- [23] Hosogi D, Nakamura K, Kameyama A. Using forest topsoil to revegetate an artificial cut slope using a growth material spraying method[J]. Journal of the Japanese Society of Revegetation Technology, 2005,30(3):561-571.
- [24] 李才才,白梨花,王一帆,等. 植被修复对退化草地固碳的影响及展望[J]. 内蒙古草业,2012,24(2):6-12,15.
- [25] Rodriguez D, Goudriaan J. Effects of phosphorus and drought stresses on dry matter and phosphorus allocation in wheat[J]. Journal of Plant Nutrition, 1995,18(11):2501-2517.
- [26] 张璐,沈善敏,宇万太,等. 辽西褐土施肥及养分循环再利用中长期试验(V):不同降水年景作物产量对施肥的反应和水肥交互作用[J]. 应用生态学报,2003,14(12):2205-2207.
- [27] 王火焰,周健民,陈小琴,等. 氮磷钾肥料在土壤中转化过程的交互作用(Ⅱ):硫酸铵在水稻土中的转化[J]. 土壤学报,2005,42(1):70-77.
- [28] Mandal B, Mukhopadhyay A K. Ammonium fixation in soils from application of  $\text{NH}_4^+$ -producing fertilizers[J]. Journal of the Indian Society of Soil Science, 1984,32(3):486-487.

- [9] 刘佳. 园林废弃物堆肥化研究及应用[D]. 天津:天津城市建设学院, 2012.
- [10] 李凤霞. 盐碱地土壤微生物多样性特征研究[M]. 宁夏:阳光出版社, 2015:58.
- [11] 田善义, 王明伟, 成艳红, 等. 化肥和有机肥长期施用对红壤酶活性的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(15):4963-4972.
- [12] 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, 1999:85.
- [13] 林先贵. 土壤微生物研究原理与方法[M]. 北京:高新教育出版社, 2017:250.
- [14] 刘育红, 魏卫东, 杨元武, 等. 高寒草甸退化草地植被与土壤因子关系冗余分析[J]. 西北农业学报, 2018, 27(4):480-490.
- [15] Ghafoor A, Hina K, Murtaza G. Estimation of Gapon exchange coefficient for different textured soils and landforms of Punjab, Pakistan [J]. Pakistan Journal of Agricultural Sciences, 2004, 41(1/2), 25-28.
- [16] 赵丽丽, 张振华, 李陆生. 滨海盐渍土和棕壤咸水入渗特征分析[J]. 水土保持通报, 2013, 33(3):44-48, 117.
- [17] 王晓洋, 陈效民, 李孝良, 等. 不同改良剂对滨海盐渍土水盐特性的影响[J]. 水土保持通报, 2013, 33(1):261-264.
- [18] 王晓洋, 陈效民, 李孝良, 刘祖香. 不同改良剂与石膏配施对滨海盐渍土的改良效果研究[J]. 水土保持通报, 2012, 32(3):128-132.
- [19] 解丽娜, 贡璐, 朱美玲, 等. 塔里木盆地南缘绿洲土壤酶活性与理化因子相关性[J]. 环境科学研究, 2014, 27(11):1306-1313.
- [20] 解雪峰, 濮励杰, 王琪琪, 等. 滨海滩涂围垦区不同围垦年限土壤酶活性变化及其与理化性质关系[J]. 环境科学, 2018, 39(3):1404-1412.
- [21] 徐宪斌. 蚯蚓粪配施化肥对玉米根际土壤生物学特征的影响[J]. 水土保持通报, 2017, 37(1):78-82.
- [22] 何瑞成, 吴景贵. 有机物料对原生盐碱地土壤生物学性质的影响[J]. 土壤学报, 2018, 55(3):774-782.
- [23] Shi Shaohua, Tian Lei, Nasir Fahad, et al. Response of microbial communities and enzyme activities to amendments in saline-alkaline soils [J]. Applied Soil Ecology, 2019, 135:16-24.
- [24] 臧逸飞, 郝明德, 张丽琼, 等. 26年长期施肥对土壤微生物量碳、氮及土壤呼吸的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(5):1445-1451.
- [25] 景宇鹏, 李跃进, 姚一萍, 等. 盐渍化土壤酶活性及其与微生物、理化因子的关系[J]. 中国农业科技导报, 2016, 18(2):128-138.
- [26] 陶磊, 褚贵新, 刘涛, 等. 有机肥替代部分化肥对长期连作棉田产量、土壤微生物数量及酶活性的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(21):6137-6146.

(上接第 159 页)

- [29] Fan M X, Mac Kenzie A F. Interaction of urea with triple superphosphate in a simulated fertilizer band[J]. Fertilizer Research, 1993, 36(1):35-44.
- [30] 张秋英, 刘晓冰, 金剑, 等. 水肥耦合对大豆光合特性及产量品质的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2003, 21(1):47-50.
- [31] 任爱霞, 孙敏, 王培如, 等. 深松蓄水和施磷对旱地小麦产量和水分利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(19):3678-3689.
- [32] 李开峰, 张富仓, 祁有玲, 等. 根区水肥空间耦合对冬小麦生长及产量的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(12):3154-3160.
- [33] Gross K L. A comparison of methods for estimating seed numbers in the soil[J]. Journal of Ecology, 1990, 78(4):1079-1093.
- [34] Viets F G. Water deficits and nutrient availability // Kozlowsk T T(ed). Water Deficits and Plant Growth [M]. New York: Academic Press, 1972.
- [35] 华元刚, 陈秋波, 林钊沐, 等. 水肥耦合对橡胶树产胶量的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(6):1211-1216.
- [36] 张富仓, 高月, 焦婉如, 等. 水肥供应对榆林沙土马铃薯生长和水肥利用效率的影响[J]. 农业机械学报, 2017, 48(3):270-278.
- [37] Thompson T, Doerge T A, Godin R E. Nitrogen and water interactions in subsurface drip-irrigated cauliflower(II): Agronomic, economic, and environmental outcomes[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(1):412-418.
- [38] Yadav R S, Sharwa R K, Pandey U K, et al. Effect of various water potential treatment on nitrate reductase activity in wheat genotypes[J]. Agricultural Science Digest, 1998, 18(2):73-75.