

吴家龙, 戴 军, 冯 宏, 等. 水土保持先锋植物类芦对酸铝胁迫的响应[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(10): 2226–2233.

WU Jia-long, DAI Jun, FENG Hong, et al. Effects of acidity and aluminum stress on the growth of *Neyraudia reynaudiana*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(10): 2226–2233.

水土保持先锋植物类芦对酸铝胁迫的响应

吴家龙^{1,2}, 戴 军^{1,2}, 冯 宏^{1,2}, 邓 婷^{1,2}, 钱 欢^{1,2}, 郭彦彪^{1,2*}

(1. 华南农业大学资源环境学院, 广州 510642; 2. 农业部耕地保育重点实验室, 广州 510642)

摘 要: 通过营养液培养试验, 研究了不同pH值和不同浓度铝(Al)对水土保持先锋植物类芦(*Neyraudia reynaudiana*)生长的影响。结果表明, pH为2.5的极强酸性条件或很高的Al浓度($\geq 3000 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)条件均会显著抑制类芦的生长, 在pH 3.5和4.5条件下, Al浓度 $\leq 1000 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 对类芦生长无显著抑制作用。pH为4.5的条件比pH为6.15的条件更有利于类芦的生长。除pH为2.5的极强酸性环境会显著抑制类芦对氮、磷和钾的吸收外, 其他试验条件对类芦吸收氮、磷和钾的影响较小或没有影响, 说明类芦在酸铝胁迫下对氮、磷和钾有高效利用的能力。总之, 类芦对酸铝胁迫有较强的耐受能力, 在酸性土壤和酸性矿区植被恢复中具有较大的应用潜力。

关键词: 先锋植物; 水土保持; 类芦; pH; 铝; 酸

中图分类号: X53 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2018)10-2226-08 doi:10.11654/jaes.2017-1723

Effects of acidity and aluminum stress on the growth of *Neyraudia reynaudiana*

WU Jia-long^{1,2}, DAI Jun^{1,2}, FENG Hong^{1,2}, DENG Ting^{1,2}, QIAN Huan^{1,2}, GUO Yan-biao^{1,2*}

(1. College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. Key Laboratory of Arable Land Conservation in South China, Ministry of Agriculture, Guangzhou 510642, China)

Abstract: A hydroponic experiment was conducted to evaluate the effects of different pH levels and aluminum (Al) concentrations on the growth of *Neyraudia reynaudiana* growth, which is a pioneer plant for soil and water conservation. The results indicated that the growth of *Neyraudia reynaudiana* was inhibited significantly under the condition of pH 2.5 and high Al concentration ($\geq 3000 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) ($P < 0.05$). Under the conditions of pH 3.5 and 4.5, an Al concentration of $1000 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ or below did not inhibit *Neyraudia reynaudiana* growth. *Neyraudia reynaudiana* grew better under the condition of pH 4.5 than that of pH 6.5. The ability of *Neyraudia reynaudiana* to absorb nitrogen, phosphorus, and potassium was significantly inhibited under the condition of pH 2.5. However, under other experimental conditions, the absorptions of N, P, and K were unaffected by pH level and Al concentration. The results implied that *Neyraudia reynaudiana* had high use efficiencies for N, P, and K under stresses of acidity and Al. Therefore, it can be concluded that *Neyraudia reynaudiana* have strong resistance to the stresses of acidity and Al and is a good species for revegetation in acidic soil regions or mine areas.

Keywords: pioneer plant; soil and water conservation; *Neyraudia reynaudiana*; pH; aluminum; acidity

在我国热带和亚热带地区广泛分布着大面积的酸性土壤, 受东南季风气候、高温多雨的影响, 由于强烈的风化淋溶作用, 这类土壤大都呈酸性或强酸性反

应, 且呈现出加速发展的趋势^[1], 有些土壤pH已经低至4.0以下^[2-3], 随着土壤酸化的加剧, 土壤中的可溶性铝(Al)急剧增加, 成为酸性土壤中限制植物生长的

收稿日期: 2017-12-15 录用日期: 2018-03-29

作者简介: 吴家龙(1989—), 男, 河南遂平人, 博士研究生, 从事矿山植被恢复研究。E-mail: jialongw003@163.com

*通信作者: 郭彦彪 E-mail: guoyanbiao@scau.edu.cn

基金项目: 广东省自然科学基金项目(2015A030313404); 广东省水利科技创新项目(2014-18)

Project supported: The Natural Science Foundation of Guangdong Province, China(2015A030313404); The Water Science and Technology Innovation Project of Guangdong Province, China(2014-18)

主导因素。含硫金属矿山由于矿产开采,金属硫化物暴露于空气后氧化而产生大量的酸性废水,导致矿区各类废弃物严重酸化,其pH更是低至3.0以下,随之造成Al的大量溶出^[4],可能是植被恢复的限制因素之一。关于Al对植物生长的影响,国内外已经开展了大量研究^[5-6],荞麦^[7]、大麦^[8]等农作物、草类^[9]和华南地区酸性土壤中的先锋乔木树种马尾松^[10]等对Al胁迫的响应规律均有研究报道,从现有研究明显看出,Al对不同植物生长的影响程度差别很大,而且现有研究缺乏pH值低于4.0的强酸性条件下植物的铝毒效应研究^[11-12],使得严重酸化土壤种植及酸性矿区植被恢复时在土壤改良和植物种筛选方面均缺乏理论指导。南方红壤区分布着大量适合酸性土壤条件的优良水土保持乡土草本植物,在严重退化生态系统的恢复中起着举足轻重的作用,类芦(*Neyraudia reynaudiana*)是其中最优良的水土保持先锋植物之一,属多年生禾本科大型密丛型草本植物,广泛分布于我国长江以南的中亚热带至热带各省区,具有极强抗逆境生存能力^[13-14],是植被恢复的先锋植物^[15],在裸露边坡植被重建^[16]和矿区植被恢复^[17]方面往往起着最先定植固土、改良土壤水分条件,为其他植物侵占提供有利条件的先锋作用^[18],具有巨大的应用价值。但是类芦对酸性条件和铝胁迫以及在酸铝双重胁迫下的耐受能力至今未得到系统研究。本研究通过营养液培养实验,对不同pH值与不同Al浓度组合的多种酸铝条件下类芦植株的生长和养分吸收能力进行了研究,研究结果对进一步探索酸铝对类芦生长影响机制、充分挖掘类芦这一优良水土保持先锋植物资源和生态恢复时土壤改良标准的制定提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

类芦幼苗由当年新采集的种子在洗净的河沙中培育而成,待幼苗生长至20 cm左右时用于试验。不同pH值用稀H₂SO₄进行调节,不同Al浓度用[Al₂(SO₄)₃·18H₂O](分析纯)进行配制。营养液培养试验以1/2Hogland营养液作为基础培养液,所有营养液用高纯水配制。然后以此为基础先用Al₂(SO₄)₃·18H₂O配制铝浓度分别为0、10、40、200、1000 μmol·L⁻¹和3000 μmol·L⁻¹的处理液,然后再用稀硫酸调节处理液的pH,最终配制成pH 6.15、4.5、3.5、2.5的处理液。本试验设置4个pH水平、6个Al浓度,每个处理设置3个重复。考虑到Al的氢氧化物Al(OH)₃(无定形)的

溶度积(1.3×10⁻³³)^[19]比较低,当pH达到4.5时,200 μmol·L⁻¹以上浓度因产生沉淀而无法达到设定浓度,因此本实验在pH 4.5时未设置较高浓度的Al处理。各处理pH值和Al浓度见表1。

表1 不同pH值和Al浓度处理实验方案

Table 1 Experiment scheme for stress of pH and Al on

N. reynaudiana

pH		Al/μmol·L ⁻¹				
2.5	0	10	40	200	1000	3000
3.5	0	10	40	200	1000	3000
4.5	0	10	40	—	—	—
6.15	0	—	—	—	—	—

注:“—”表示无此处理,下同。

Note: “—” means that the treatment is not set up, the same below.

1.2 试验方法

营养液培养试验于2014年10月至12月期间在华南农业大学资源环境学院塑料大棚中进行,先将类芦幼苗从沙中小心挖出,轻轻洗净根部细沙,然后选择长势一致的幼苗移栽到装有2 L营养液的塑料瓶中,先用完全营养液培养1周后再用相应的处理液进行处理,放置于塑料大棚内培养,每日用空气泵充气6 h,并根据水分损失情况补充水分,每周更换1次处理液,生长2个月后收获,测定各指标。试验处理结束后先测定其株高和分蘖数,然后小心将植株从塑料瓶中取出,将地下部和地上部分开,地下部依次用自来水、蒸馏水、高纯水小心清洗后用滤纸吸干表面水分,然后与地上部同时在105℃杀青30 min后,70℃烘干至恒质量,分别称量地上部和地下部生物量。将各样品粉碎后用H₂SO₄-H₂O₂消煮,凯氏法测植株全氮;钼钼黄比色法测植株全磷;火焰分光光度法测植株全钾,具体测试方法参考《土壤农化分析(第三版)》^[20]。

1.3 数据处理

用Excel 2003进行数据整理,运用SPSS 23.0统计软件进行方差分析和Duncan多重比较,显著性水平取α=0.05。

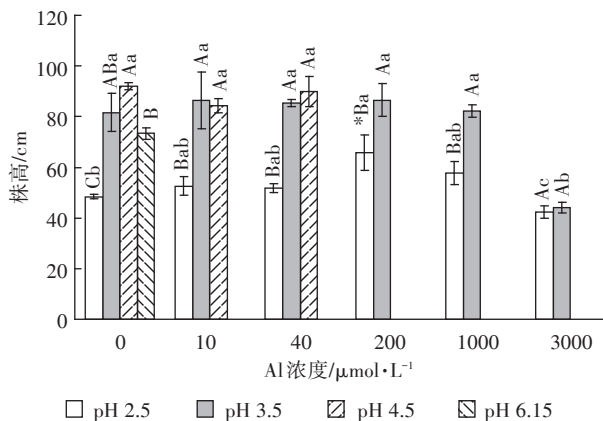
2 结果与分析

2.1 不同pH值和Al浓度对类芦株高和分蘖能力的影响

在营养液培养条件下,不同pH值和Al浓度对类芦株高的影响如图1所示。在各Al浓度处理中,pH 3.5和pH 4.5处理的株高均显著高于pH 2.5处理,而

pH 3.5和pH 4.5处理之间并无显著差异,在无Al条件下,pH 6.15处理的株高虽然显著高于pH 2.5处理,但显著低于pH 4.5处理。在pH 2.5条件下,随着Al浓度的升高,类芦株高呈现出先升高后下降的趋势,其中 $3000 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理显著低于其他Al浓度处理, $200 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理株高最高。而在pH 3.5条件下,除 $3000 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理显著低于其他Al浓度处理外,其他Al浓度对类芦株高无显著影响。除了 $3000 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $1000 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Al处理外,一定的酸性条件更有利于类芦植株的生长,只有pH 2.5的极强酸条件才显著抑制类芦株高,较高的pH条件(pH 6.15)也会对类芦的株高有一定抑制作用。

水土保持先锋植物的分蘖能力是衡量其侵占地表性能的重要指标。图2为不同pH值和Al浓度对类芦分蘖数的影响。从图中可以看出,在相同Al浓度条件下,pH 2.5处理的分蘖数显著低于pH 3.5和pH 4.5处理,而pH 3.5和pH 4.5处理之间并无显著差异,当Al浓度为0时,pH 6.15处理的分蘖数显著低于pH 3.5处理。当pH为4.5时,Al浓度对分蘖数无显著影响;pH为3.5时, $3000 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理显著少于其他处理,除 $40 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理外,其他处理均显著比无Al处理($0 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)少;而pH为2.5时,除 $200 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Al



图中不同Al浓度处理之间以不同小写字母表示差异显著,

不同pH值处理之间以不同大写字母表示差异显著, $n=3, P<0.05$,下同。

* $200 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 条件下,不同pH处理在 $\alpha=0.1$ 水平上显著,下同

Different lowercase letters used to show the significant differences between different Al concentrations, and the significant difference between pH values are marked by different capital letters in the figure ($n=3, P<0.05$), the same below. *means the differences pH treatments were significant at 10% level, the same below

图1 不同pH值和Al浓度对类芦株高的影响

Figure 1 Effects of pH and Al concentration on the height of *N. reynaudiana*

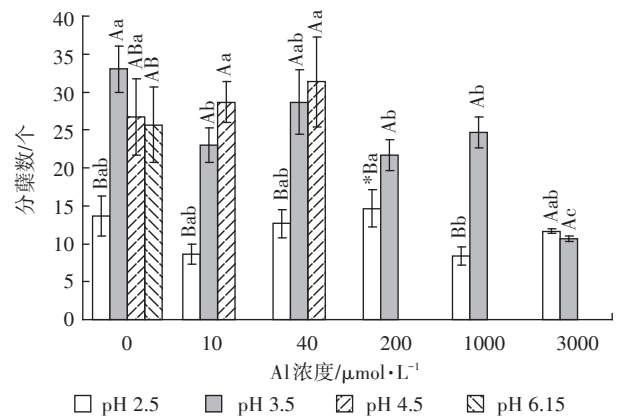


图2 不同pH值和Al浓度对类芦分蘖的影响

Figure 2 Effects of pH and Al concentration on the tiller number of *N. reynaudiana*

处理显著高于 $1000 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理外,其他处理分蘖数之间无显著差异。可见极低的pH条件和 $3000 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的高Al浓度对类芦分蘖能力均有显著的抑制作用。但两个因素(pH值和Al浓度)对类芦株高和分蘖数的影响无显著的交互作用,即二者之间并无相互加强对株高和分蘖数的抑制作用。

2.2 不同pH值和Al浓度对类芦生物量的影响

不同pH值和Al浓度条件下类芦地上部和地下部生物量见图3和图4。从图中可以看出,当Al浓度相同时,pH 2.5处理的地上部和地下部生物量均显著低于pH 3.5、pH 4.5和pH 6.15处理,而pH 3.5、pH 4.5以及pH 6.15处理之间的地上和地下生物量均无显著差异,表明类芦生物物质积累仅在极强酸环境(pH 2.5)下受到抑制,强酸环境(pH 3.5)并不影响类芦生物物质的积累。在pH 2.5的条件下,只有 $200 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Al处理

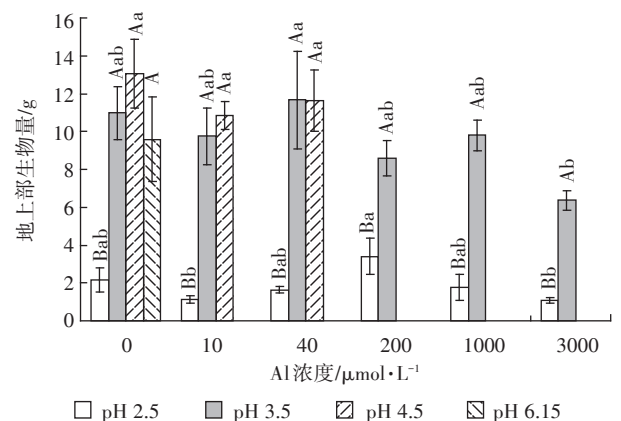


图3 不同pH值和Al浓度条件下类芦地上部生物量

Figure 3 Effects of pH and Al on aboveground biomass of *N. reynaudiana*

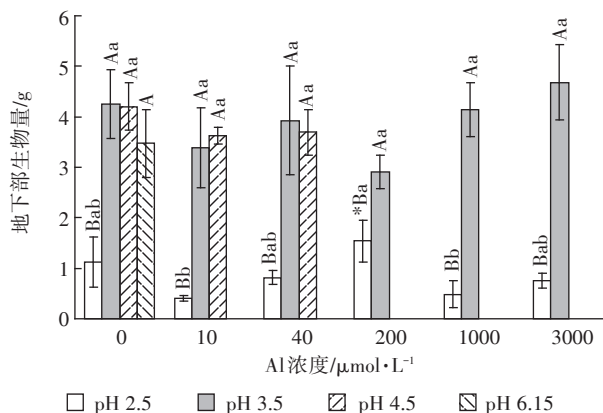


图4 不同pH值和Al浓度对类芦地下部生物量的影响

Figure 4 Effects of pH and Al on the underground biomass of *N. reynaudiana*

的地上生物量显著高于 $10 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $3000 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理,地下生物量显著高于 $10 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $1000 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Al 处理。在其他 pH 条件下,除 $3000 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Al 处理地上部生物量显著低于 $40 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理外,其他 Al 浓度处理之间地上和地下生物量均无显著差异,表明在非极端酸性条件下,只有 Al 浓度达到 $3000 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时才会对植株地上部生物量的积累产生抑制作用,而地下部在此条件下仍能正常生长。结果也显示,pH 值和 Al 浓度对类芦地上部和地下部生物量的积累同样无交互作用。

2.3 不同pH值和Al浓度条件下类芦对养分的吸收能力

氮素是植物生长必不可少的大量元素之一,植株各部位氮素含量表明了植物对氮素的吸收和转运能力。不同 pH 值和 Al 浓度条件下类芦地上部全氮含量见图 5。在相同 Al 浓度条件下,在 $0 \leq \text{Al} \leq 10 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的范围内,地上部全氮含量在 pH 2.5 和 4.5 处理之间没有显著差异,而 pH 3.5 处理的地上部全氮含量低于 pH 2.5 和 4.5 的处理。 $40 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Al 浓度条件下 3 个 pH 处理之间地上部氮含量没有差异,当 Al 浓度为 200 、 $1000 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $3000 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,pH 3.5 处理均显著高于 pH 2.5 的处理。

在 pH 2.5 的条件下,随着 Al 浓度的提高,类芦地上部氮含量逐渐降低,其中 $10 \sim 200 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Al 处理与无 Al 处理没有显著差异,而当 Al 浓度达到 $1000 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,地上部氮含量则显著低于无 Al 处理。当 pH 为 3.5 时, $200 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Al 处理的地上部含氮量最高,Al 浓度高于或低于这一水平均使其含氮量随之下降,其中无 Al 和 $10 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Al 处理与 $200 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理之间的差异达到了显著水平。pH 为 4.5 时 Al 浓

度对植株地上部全氮含量没有影响。由此可以看出,只有极低 pH 和极高的 Al 浓度才严重抑制类芦地上部氮素的积累。

不同 pH 值和 Al 浓度条件下对类芦地下部全氮含量的影响见图 6。在不同 pH 处理之间,总体表现为 pH 2.5 处理的地下部全氮含量较高,其他 pH 处理相对较低,其中 0 、 $1000 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $3000 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Al 浓度条件下,pH 2.5 处理的地下部氮含量显著高于 pH 3.5 处理,其他浓度处理的不同 pH 之间无显著差异。当 pH 为 3.5 时, $200 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Al 处理地下部含氮量显著高于 0 、 $1000 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $3000 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理,其他 Al 浓度处理之间无显著差异。而在 pH 2.5 和 pH 4.5 条件下,Al 浓度对类芦地下部全氮含量亦无显著影响。对比地上部与地下部氮含量范围,pH 2.5 条件下,随着 Al 浓度的增加,地上与地下氮含量逐渐减

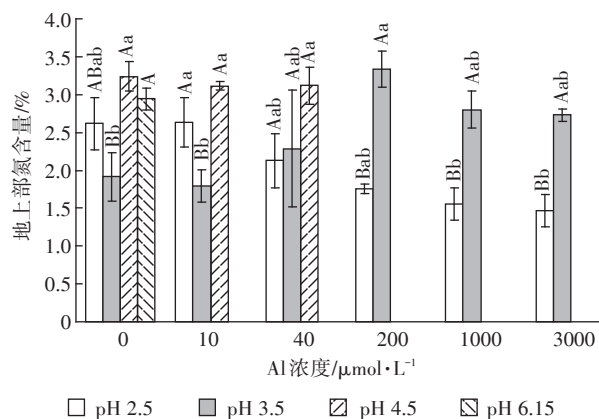


图5 不同pH值和Al浓度对类芦地上部全氮含量的影响

Figure 5 Effects of pH and Al on the total nitrogen content in the aboveground of *N. reynaudiana*

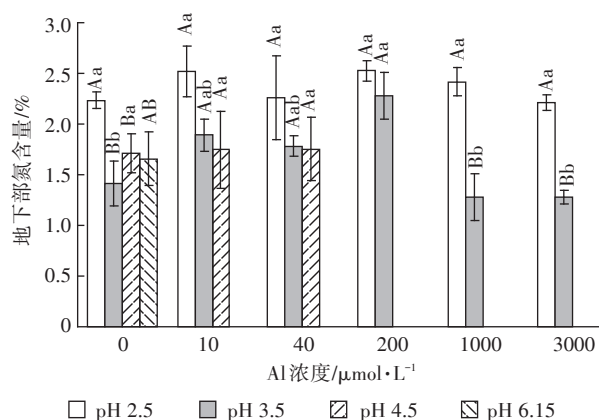


图6 不同pH值和Al浓度对类芦地下部全氮含量的影响

Figure 6 Effects of pH and Al on the total nitrogen content in the underground of *N. reynaudiana*

小,表明氮素从地下部向地上部的转移受阻,而其他pH条件下,均为地上部氮含量高于地下部。

不同pH值和Al浓度条件下类芦地上部和地下部全磷含量见图7和图8。从图8中可以看出,pH值和Al浓度的变化均未对各处理植株地上部全磷含量产生显著性的影响,说明在本实验条件下,pH值和Al浓度的变化不影响植株地上部对磷的积累。从图9中可以看出,无Al和10 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Al浓度条件下pH 2.5和pH 3.5处理之间地下部磷含量无显著差异,但均显著低于pH 4.5和pH 6.15处理,其他Al浓度条件下则pH 2.5处理的地下部全磷含量均显著低于同一Al浓度下的其他pH值处理。pH 3.5条件下类芦地下部全磷含量随Al浓度的升高而显著性降低,其他pH值条件下Al浓度的变化对类芦地下部全磷含量均无显著性影响。由前面分析可知,pH 2.5条件下,地下部生物量显著低于其他处理,而此处磷的含量也显著

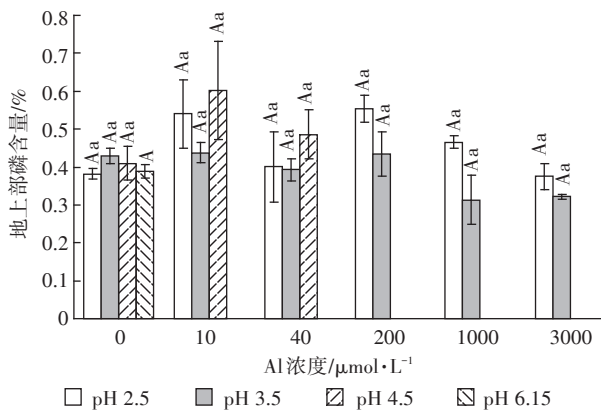


图7 不同pH值和Al浓度对类芦地上部全磷含量的影响

Figure 7 Effects of pH and Al on the total phosphorus content in aboveground of *N. reynaudiana*

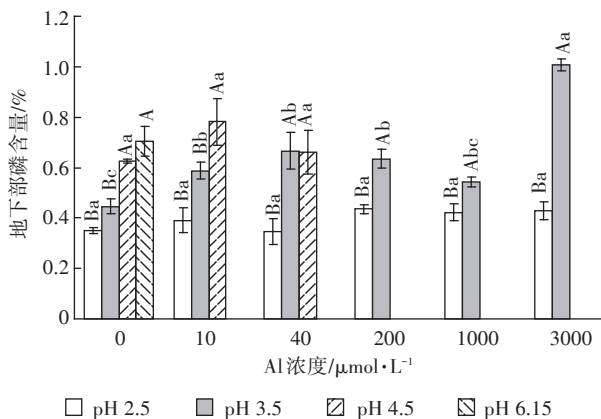


图8 不同pH值和Al浓度对类芦地下部全磷的影响

Figure 8 Effects of pH and Al on the total phosphorus content in the underground of *N. reynaudiana*

低于其他处理,由此可见,极低的pH会严重抑制类芦地下部磷素的积累。

不同pH值和Al浓度对类芦地上部全钾含量的影响如图9所示。当Al浓度为0、1000 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和3000 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,不同pH处理之间的类芦地上部全钾含量无显著差异,而当Al浓度为10、40 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和200 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,随pH升高,类芦地上部全钾含量也随之升高,在10 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和40 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Al浓度条件下,pH 2.5与pH 4.5处理之间达到显著差异,200 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Al浓度条件下,pH 3.5处理的植株地上部全钾含量显著高于pH 2.5。只有pH 3.5处理中Al浓度对植株地上部钾含量有显著影响,在pH 3.5处理中,10、40 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和200 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的处理植株地上部全钾含量显著高于3000 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理,表现为中等Al浓度处理有利于地上部钾的积累。以上分析可以看出,pH 2.5严重抑制了其地上部对钾的积累,导致Al浓度的变化不再对地上部钾的含量具有影响,而当pH升高到3.5时,酸本身对类芦的影响减小,此时Al浓度达到3000 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 就会对植株地上部钾含量产生显著抑制作用。

不同pH值和Al浓度对类芦地下部全钾含量的影响见图10。从图中可以看出,在各Al浓度水平下,只有pH 2.5显著抑制了植株地下部对钾的积累,其钾含量显著低于其他pH处理,而其他pH处理之间地下部全钾含量无显著差异,表明只有极端酸性条件才造成类芦地下部全钾含量的显著减少;在pH 4.5条件下,10 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Al处理地下部全钾含量显著高于无Al处理外,其他pH条件下Al浓度处理对类芦地下生物量均未产生显著影响。由此可见,pH 2.5的极强酸

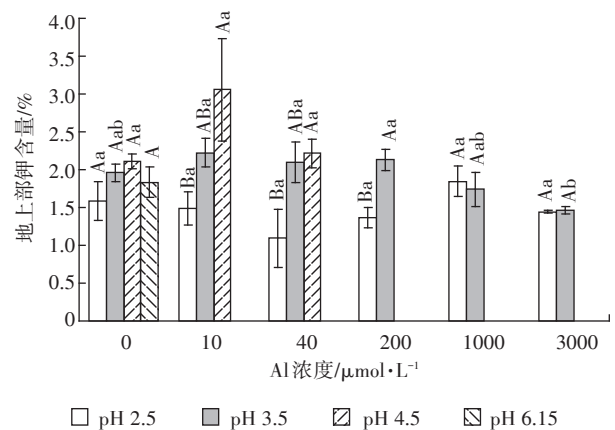


图9 不同pH值和Al浓度对类芦地上部全钾含量的影响

Figure 9 Effects of pH and Al on the potassium content in aboveground of *N. reynaudiana*

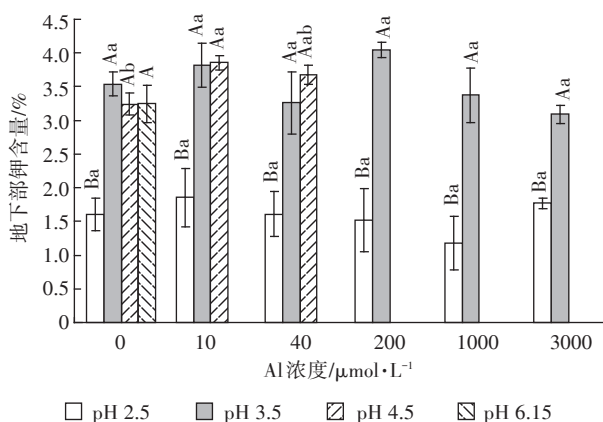


图10 不同pH值和Al浓度对类芦地下部全钾含量的影响

Figure 10 Effects of pH and Al on the potassium content in root of *N. reynaudiana*

条件都严重抑制了类芦地上和地下对钾的积累,但在pH 3.5条件下,3000 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的高浓度Al处理只影响到地上部对钾的积累,并未影响其地下部对钾素的吸收,这可能是高浓度Al处理下钾向植株地上部的运输受到阻碍导致的。

3 讨论

3.1 pH值对植物生长的影响

pH值可以直接影响植物生长^[21]、养分吸收^[22-23]等,不同的植物对pH有不同的适应范围。本研究中pH 2.5条件下各处理根尖伸长受阻,根系短小,当pH ≥ 3.5 时,各处理根系正常生长,pH为6.15时,类芦株高和分蘖数反而不及酸性条件,综合来看,pH 4.5条件下,类芦生长更好,表明类芦适合在酸性条件下生长,这与陈雪娇等的研究结果一致^[24]。较早研究发现,当pH ≤ 4.0 时,类芦种子萌发会受到影响^[24],而本研究 and 前人研究^[24]显示类芦在pH 3.5的条件下仍然能够正常生长,表明类芦种子萌发受酸的影响更大,而植株生长过程中耐酸能力更强,可见类芦植株对酸性环境具有很强的适应能力和自我调节能力。

3.2 Al对植物生长和养分吸收的影响

铝毒是酸性土壤(pH <5.0)中限制植物生长的主要因子之一^[26],会抑制植物对养分的吸收^[27],会抑制植物的地上部和根部的生长,使生物量降低^[28-29]。但不同植物对铝毒的耐受能力不同,对红三叶草、高粱、大豆、红云杉、小麦和大麦以及马尾松的生长产生严重抑制的Al浓度分别为0.04、0.07、0.18、0.25、0.37 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和1.0 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。也有报道指出,当Al浓度达到400 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,会造成荞麦死亡^[30],100~500 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

时,黑麦草根系停止生长^[31]。对于南方重要的经济树种桉树而言,砂土培育pH 3.0条件下120 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Al处理对桉树幼苗的生长产生的抑制作用明显,叶、芽皱缩、变形,质膜透性和叶绿素含量下降^[32]。广东大宝山矿区酸性矿山废水中Al浓度范围为62~100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (pH 2.4~2.57)^[4,33],据测定,pH为3.9的自然土壤和2.94的矿区弃土的土壤溶液中Al浓度分别为31.4 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和2068 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,而红壤模拟酸雨淋出液中Al浓度最高仅为0.1 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ (约2.7 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)^[34],可见酸性矿山弃土因酸化严重而导致Al活化程度要比自然酸性土壤严重得多,Al浓度足可以达到严重抑制植物生长的浓度。本研究中类芦能够在3000 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Al (=81 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, pH 2.5和pH 3.5)的环境中生存且保持一定的生物量,且在pH 3.5条件下,根系生长未受到影响,说明类芦也具有非常强的耐酸铝毒能力,在酸性土壤分布区和酸性矿区植被恢复中有巨大的应用潜力。前人研究发现,低浓度的Al则有利于植株的生长^[35],本研究中pH 2.5条件下200 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Al处理的株高和分蘖最高,这可能是Al对类芦生长的Hormesis效应,该效应是自然界普遍存在的剂量-反应规律,通常表现为随浓度的增加而先出现促进作用(低浓度范围),达到一定剂量时出现抑制作用^[36]。分蘖能力对于水土保持植物而言尤为重要,分蘖能力的正常发挥与否除了关系到植物对土壤的固持能力以外,还会直接影响植物对养分元素的吸收^[37]。类芦具有较强的分蘖能力,但是逆境条件对其分蘖有抑制作用^[38]。本研究中pH 2.5的极强酸性环境和3000 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的高浓度Al条件明显抑制了类芦的分蘖,其他处理的类芦分蘖数均达到20以上,这进一步证实了类芦具有强大的分蘖能力。氮素供应水平对类芦生长的影响非常大^[39],本研究中极低的pH和高浓度的Al对类芦地上部氮的吸收有一定抑制作用,进而影响类芦生长;类芦具有较强的耐低磷能力^[40],本研究发现即使pH 2.5的极强酸性环境对类芦地上部吸收磷和钾的能力没有显著影响,但会抑制地下部对磷和钾的吸收,3000 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的高浓度Al条件会抑制地上部钾的吸收,但对地上部磷和地下部的磷钾吸收都没有显著影响,可见类芦在Al胁迫条件下仍能维持体内较高含量的磷、钾和根部的氮吸收能力,以维持自身正常的生长能力。由于Al离子的水解作用,pH和Al离子浓度相互影响^[41]。本研究pH和Al离子浓度对类芦生长以及养分吸收均无显著的交互作用,原因可能是酸和Al对类芦的毒害作用机理不同,因此在pH和Al离

子的作用下未表现出相互加强或相互抑制的交互作用,相关机理需要进一步研究。

4 结论

通过以上分析,本研究得出以下主要结论:在本试验条件下,类芦在 pH 2.5~6.15 环境中都能够存活并生长,其中在 pH 3.5 和 4.5 环境中生长更好,只有在强酸性条件(pH 2.5)或很高的 Al 浓度($\geq 3000 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)条件下生长才会受到明显的抑制;在非极端酸铝胁迫条件下,类芦具有对较大范围酸铝环境的适应能力,酸铝条件对类芦的氮磷钾三大元素的吸收能力影响较小,尤其是磷和钾。由此可见,类芦在强酸性土壤的植被恢复中具有极大的应用潜力,应充分挖掘其先锋植物的潜力。

参考文献:

- [1] 徐仁扣. 酸化红壤的修复原理与技术[M]. 北京:科学出版社, 2012: 1-6.
XU Ren-kou. Amelioration principles and technologies for acidified red soils[M]. Beijing: Science Press, 2012: 1-6.
- [2] 冯 宏, 郭彦彪, 韦翔华, 等. 赤红壤丘陵坡地不同侵蚀部位土壤养分和微生物特征变异性研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(6): 149-152.
FENG Hong, GUO Yan-biao, WEI Xiang-hua, et al. Study on variation of soil nutrient and microbe on different erosion position of hilly slope in latosolic red soil region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(6): 149-152.
- [3] 刘菊秀, 周国逸, 褚国伟, 等. 鼎湖山季风常绿阔叶林土壤酸度对土壤养分的影响[J]. 土壤学报, 2003, 40(5): 763-767.
LIU Ju-xiu, ZHOU Guo-yi, CHU Guo-wei, et al. Effects of soil acidity on the soil nutrients under Dinghushan monsoon evergreen broad-leaved forest[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(5): 763-767.
- [4] Lu W, Ma Y, Lin C. Status of aluminum in environmental compartments contaminated by acidic mine water[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 189(3): 700-709.
- [5] Lidon F C. An overview into aluminum toxicity in maize[J]. *Bulgarian Journal of Plant Physiology*, 2002, 28(3/4): 96-112.
- [6] Poschenrieder C, Gunse B, Corrales I, et al. A glance into aluminum toxicity and resistance in plants[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 400(1/2/3): 356-368.
- [7] 李朝苏, 刘 鹏, 蔡妙珍, 等. 荞麦对酸铝胁迫生理响应的研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(3): 105-109.
LI Chao-su, LIU Peng, CAI Miao-zhen, et al. Physiological response of buckwheat to acid-aluminum stress in growth[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(3): 105-109.
- [8] 郭天荣, 张国平, 卢王印, 等. 铝胁迫对不同耐铝大麦基因型干物质积累与铝和养分含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(3): 324-330.
GUO Tian-rong, ZHANG Guo-ping, LU Wang-yin, et al. Effect of Al on dry matter accumulation and Al and nutrition contents of barleys differing in Al tolerance[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2003, 9(3): 324-330.
- [9] Ezaki B, Nagao E, Yamamoto Y, et al. Wild plants, *Andropogon virginicus* L. and *Miscanthus sinensis* Anders, are tolerant to multiple stresses including aluminum, heavy metals and oxidative stresses[J]. *Plant Cell Reports*, 2008, 27(5): 951-961.
- [10] 赵志刚, 丁贵杰, 唐 敏. 酸、铝胁迫对马尾松种子萌发与芽苗生长的影响[J]. 林业科学研究, 2007, 20(1): 111-115.
ZHAO Zhi-gang, DING Gui-jie, TANG Min. The effect of acid and aluminum stress on seed germination and seedling growth of *Pinus massoniana*[J]. *Forest Research*, 2007, 20(1): 111-115.
- [11] Ali S, Zeng F R, Qiu B Y, et al. Interactive effects of aluminum and chromium stresses on the uptake of nutrients and the metals in barley [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2011, 57(1): 68-79.
- [12] Guo T, Zhang G, Zhou M, et al. Effects of aluminum and cadmium toxicity on growth and antioxidant enzyme activities of two barley genotypes with different Al resistance[J]. *Plant and Soil*, 2004, 258(1): 241-248.
- [13] 韩 航, 陈雪娇, 侯晓龙, 等. Cd 胁迫对类芦生长及酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(4): 647-653.
HAN Hang, CHEN Xue-jiao, HOU Xiao-long, et al. Effects of cadmium stresses on growth and antioxidant activities of *Neyraudia reynaudiana*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(4): 647-653.
- [14] 郑本暖, 叶功富, 卢昌义. 干旱胁迫对4种植物蒸腾特性的影响[J]. 亚热带植物科学, 2007, 36(1): 36-38.
ZHENG Ben-nuan, YE Gong-fu, LU Chang-yi. Effect of drought stress on the characteristics of transpiration of 4 plants[J]. *Subtropical Plant Science*, 2007, 36(1): 36-38.
- [15] Wong M H, Tam F Y. Soil and vegetation contamination by iron-ore tailings[J]. *Environmental Pollution*, 1977, 14(4): 241-254.
- [16] 王 炜, 孙发政, 刘荣堂. 类芦对重建边坡防护植被的贡献[J]. 草原与草坪, 2006(4): 49-51.
WANG Wei, SUN Fa-zheng, LIU Rong-tang. Effect of *Neyraudia reynaudiana* on the slope protection vegetation in Shenzhen[J]. *Grassland and Turf*, 2006(4): 49-51.
- [17] 罗有发, 吴永贵, 付天岭, 等. 类芦植被对煤矸石堆场特征金属的富集特征及生物有效性的影响[J]. 地球与环境, 2016, 44(3): 329-335.
LUO You-fa, WU Yong-gui, FU Tian-ling, et al. The effects of *Neyraudia reynaudiana* vegetation on heavy metal enrichment characteristics and biological effectiveness on coal gangue dumps[J]. *Earth and Environment*, 2016, 44(3): 329-335.
- [18] 邓 恢, 张梓萍, 赵永建, 等. 种植类芦后林地芒萁生长变化的分析[J]. 福建水土保持, 2004, 16(1): 55-57.
DENG Hui, ZHANG Zi-ping, ZHAO Yong-jian, et al. Analysis of changes on the growth of *Dicranopteris pedata* after planting *Neyraudia reynaudiana* in a forest[J]. *Soil and Water Conservation*, 2004, 16(1): 55-57.

- [19] Dean J. Lange's handbook of chemistry[M]. 13rd Edition. McGraw-Hill Book Company, New York, 1985:5.
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 495.
- BAO Shi-dan. Soil agriculture chemistry analysis[M]. 3rd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000:495.
- [21] 王京元, 阎俊崎, 陈霞, 等. 土壤pH值对盆栽大豆幼苗的影响[J]. 江西农业学报, 2012, 24(2):96-97.
- WANG Jing-yuan, YAN Jun-qi, CHEN Xia, et al. Effect of soil pH-value on seedling of potted soybean[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2012, 24(2):96-97.
- [22] Rodríguez Martín J A, Arias M L, Grau Corbí J M. Heavy metals contents in agricultural topsoils in the Ebro basin (Spain). Application of the multivariate geochemical methods to study spatial variations[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 144(3):1001-1012.
- [23] 王海云, 姜远茂, 彭福田, 等. 胶东苹果园土壤有效养分状况及与产量关系研究[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2008, 39(1): 31-38.
- WANG Hai-yun, JIANG Yuan-mao, PENG Fu-tian, et al. Study on the relationship between the soil available nutrition and yield in apple orchard of Jiaodong[J]. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science)*, 2008, 39(1):31-38.
- [24] 陈雪娇, 韩航, 侯晓龙, 等. 水土保持植物类芦对土壤酸胁迫的形态生理响应[J]. 草业学报, 2017, 26(4):143-149.
- CHEN Xue-jiao, HAN Hang, HOU Xiao-long, et al. The morphological and physiological responses of the soil and water conservation plant *Neyraudia reynaudiana* to acid stress[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2017, 26(4):143-149.
- [25] 冯宏, 戴军, 李永涛, 等. 重金属和pH值对类芦种子萌发的影响[J]. 水土保持通报, 2010, 30(6):96-99.
- FENG Hong, DAI Jun, LI Yong-tao, et al. Effects of heavy metals and pH value on seed germination of burma reed[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2010, 30(6):96-99.
- [26] Delhaize E, Ryan P R. Aluminum toxicity and tolerance in plants[J]. *Plant Physiology*, 1995, 107(2):315-321.
- [27] Samac D A, Tesfaye M. Plant improvement for tolerance to aluminum in acid soils: A review[J]. *Plant Cell Tissue & Organ Culture*, 2003, 75(3):189-207.
- [28] Chaffai R, Tekitek A, Ferjani E E. Aluminum toxicity in maize seedlings (*Zea mays* L.): Effect on growth and lipid content[J]. *Journal of Agronomy*, 2005, 4(1):67-74.
- [29] He G, Zhang J, Hu X, et al. Effect of aluminum toxicity and phosphorus deficiency on the growth and photosynthesis of oil tea (*Camellia oleifera* Abel.) seedlings in acidic red soils[J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2011, 33(4):1285-1292.
- [30] 蔡妙珍, 刘鹏, 徐根娣, 等. 蓼科、禾本科植物细胞膜对铝胁迫反应的比较研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(6):122-125.
- CAI Miao-zhen, LIU Peng, XU Gen-di, et al. Comparism of plasma membrane response to Al^{3+} stress between polygonaceae plants and gramineae plants[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(6):122-125.
- [31] 陈志刚, 张红蕊, 周晓红, 等. 铝胁迫对黑麦草种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 水土保持研究, 2011, 18(4):207-210.
- CHEN Zhi-gang, ZHANG Hong-rui, ZHOU Xiao-hong, et al. Effect of aluminum stress on seed germination and seedling growth of *Lolium multiflorum*[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2011, 18(4):207-210.
- [32] 杨梅, 黄寿先, 方升佐, 等. 酸铝胁迫下4个速生桉优良无性系的生长反应[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(1):195-201.
- YANG Mei, HUANG Shou-xian, FANG Sheng-zou, et al. Response of seedling growth of four *Eucalyptus* clones to acid and aluminum stress[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(1):195-201.
- [33] Zhao H, Xia B, Qin J, et al. Hydrogeochemical and mineralogical characteristics related to heavy metal attenuation in a stream polluted by acid mine drainage: A case study in Dabaoshan mine, China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, 24(6):979-989.
- [34] 刘俐, 宋存义, 李发生. 模拟酸雨对红壤中硅铝铁释放的影响[J]. 环境科学, 2007, 28(10):2376-2382.
- LIU Li, SONG Cun-yi, LI Fa-sheng. Release of Si, Al and Fe in red soil under simulated acid rain[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(10):2376-2382.
- [35] Zeng Q, Chen R, Zhao X, et al. Aluminium uptake and accumulation in the hyperaccumulator *Camellia oleifera* Abel[J]. *Pedosphere*, 2011, 21(3):358-364.
- [36] Calabrese J E, Blain R. The occurrence of hormetic dose responses in the toxicological literature, the hormesis database: An overview[J]. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 2005, 202:289-301.
- [37] 郭孝, 陈二秋. 中原地区多年生禾草物候期特点与分蘖动态的研究[J]. 草业科学, 2002, 19(6):35-38.
- GUO Xiao, CHEN Er-qiu. Studies on phenological characteristics and tillering dynamics of perennial grasses in Central China[J]. *Pratacultural Science*, 2002, 19(6):35-38.
- [38] 林夏馨. 类芦生长和抗逆特性的分析探讨[J]. 亚热带水土保持, 2006, 18(1):48-51.
- LIN Xia-xin. Analysis of the growth and anti-inverse characteristics of *Neyraudia reynaudiana* reed[J]. *Subtropical Soil and Water Conservation*, 2006, 18(1):48-51.
- [39] 冯宏, 戴军, 吴家龙, 等. 水土保持植物类芦对氮磷钾养分水平的响应[J]. 华南农业大学学报, 2015, 36(2):31-35.
- FENG Hong, DAI Jun, WU Jia-long, et al. Effects of nitrogen, phosphorus and potassium levels on the growth of *Neyraudia reynaudiana* of soil and water conservation plant[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2015, 36(2):31-35.
- [40] 蔡丽平, 吴鹏飞, 侯晓龙, 等. 磷胁迫对水土保持先锋植物类芦光合特性的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(6):281-285.
- CAI Li-ping, WU Peng-fei, HOU Xiao-long, et al. Effects of phosphorus stress on photosynthetil characteristics of pioneer plant *Neyraudia reynaudiana* on soil and water conservation[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(6):281-285.
- [41] Wright R J. Soil aluminum toxicity and plant growth[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1989, 20:1479-1497.