

不同剂量解钾菌对滇重楼生长发育的影响

周 浓¹,许凌峰¹,杨 敏²,郭冬琴¹,丁 博¹,朱芙蓉¹,赵晶晶^{1*}

¹重庆三峡学院生物与食品工程学院,重庆 404000;²大理大学药学与化学学院,大理 671000

摘要:为深入研究不同剂量的解钾菌对滇重楼生长发育的影响。本研究通过盆栽试验,于滇重楼苗期采用灌根方式接种解钾菌,接种剂量依次为 5.83、17.50 和 35.00 g,施用等量清水为对照(CK)。结果表明,与 CK 相比,滇重楼苗期接种解钾菌可提高根系活力,增加叶片内叶绿素、类胡萝卜素、可溶性蛋白和可溶性糖含量,降低叶片内保护酶(超氧化物歧化酶、过氧化物酶和过氧化氢酶)活性以及丙二醛含量;接种解钾菌植株的老根茎和新根茎内营养元素锰(Mn)、镁(Mg)和锌(Zn)含量有所增加,而重金属铅(Pb)、铜(Cu)、砷(As)和镉(Cd)含量普遍降低。可见,不同时期接种解钾菌均可促进滇重楼植株的生长发育,增加其根茎内有益营养元素的积累,降低重金属元素含量。其中,接种 35.00 g 解钾菌对滇重楼幼苗生长的促进效果最佳,17.50 g 解钾菌的调控效果次之。

关键词:滇重楼;解钾菌;生长发育;重金属

中图分类号:R282.2

文献标识码:A

文章编号:1001-6880(2021)9-1548-10

DOI:10.16333/j.1001-6880.2021.9.013

Effect of different dosage of potassium-dissolving bacteria on growth and development of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis*

ZHOU Nong¹, XU Ling-feng¹, YANG Min²,
GUO Dong-qin¹, DING Bo¹, ZHU Fu-rong¹, ZHAO Jing-jing^{1*}

¹College of Life Science and Engineering, Chongqing Three Gorges University, Chongqing 404000, China;

²College of Pharmacy and Chemistry, Dali University, Dali 671000, China

Abstract: Effect of different doses of potassium-dissolving bacteria on growth and development in *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* was researched. In this study, the pot inoculation experiment was conducted to inoculate potassium-dissolving bacteria during the seedling stage of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis*. The inoculated doses of potassium-dissolving bacteria were 5.83, 17.50 and 35.00 g, and the same amount of water was used as the control (CK). The result showed that root vigor, chlorophyll, carotenoids, soluble protein and soluble sugar contents were increased, protective enzyme (superoxide dismutase, peroxidase and catalase) activities and malondialdehyde content were reduced by inoculation of potassium-dissolving bacteria, compared with CK. The nutrient element in new rhizomes and old rhizomes of the plants inoculated with potassium-dissolving bacteria were increased, such as manganese (Mn), magnesium (Mg) and zinc (Zn), while heavy metals were generally decreased including plumbum (Pb), cuprum (Cu), arsenic (As) and cadmium (Cd). The results showed that the seedling stage of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* inoculation with potassium-dissolving bacteria can promote the growth and development, promote the accumulation of nutrient elements in its rhizomes, and reduce contents of heavy metals. Among them, inoculation with 35.00 g of potassium-dissolving bacteria had the best effect on promoting the growth of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis*, and followed by 17.50 g of potassium-dissolving bacteria.

Key words: *Paris polyphylla* var. *yunnanensis*; potassium-dissolving bacteria; growth and development; heavy metal

收稿日期:2020-12-03

接受日期:2021-03-19

基金项目:国家自然科学基金(81260622);重庆市自然科学基金(cstc2018jcyjAX0267);云南省地方本科高校(部分)基础研究联合专项(2019FH001(-041));“成渝地区双城经济圈建设”科技创新项目(KJCX2020046)

* 通信作者 E-mail:nl140828@163.com

滇重楼(*Paris polyphylla* var. *yunnanensis*)具有消肿止痛、清热解毒、凉肝定惊等功效备受各界人士的关注,我国西南地区作为栽培滇重楼的主产区之一,其人工栽培已成为当地独具特色的生物资源和经济支柱产业^[1],由于制药工业的需求量逐年增

长,野生滇重楼资源逐年减少且日趋濒临枯竭,为了缓解市场的供需矛盾,滇重楼种植面积逐年增加,为了避免栽培滇重楼出现病虫害严重、产量降低和品质退化等现象,维持滇重楼种植区的可持续发展,种植户通过多种农业生物技术途径来提高滇重楼产量和品质^[2]。

钾是植物生长必需的营养元素之一,对植物体内的能量代谢和物质代谢具有重要的影响,土壤中能被植物利用的有效钾为钾素总量的 2%,提高土壤中钾的有效性是提高植物产量的有效途径之一。土壤中钾素多以固定钾和矿物钾的形式存在而不能被植物根系直接吸收,这成为了制约植物生长所需钾营养的一大阻碍。解钾菌亦称为钾细菌是植物根际促生菌中常见的一类,可将土壤中矿化钾转化分解成可溶性钾物质,改善根际土壤微生态环境,提高土壤中速效钾含量,从而促进植物的生长、产量的提高以及品质的改善^[3,4],增强植株的抗病力等^[5],这是因为植物根际的解钾菌能产生对土壤微生物活性有促生作用的分泌物^[6,7]。前人关于解钾菌对烤烟生长发育的调控结果表明^[8,9],适量施解钾菌能有效地增加烤烟的株高、茎围、有效叶片数、最大叶长、最大叶宽等农艺性状,使植株叶片内的总氮和钾含量有不同程度地升高^[10],显著提高了烤烟的产量和经济价值,改善了其品质。因此,解钾菌可作为微生物肥料,促进植物生长,提高植物钾素吸收,降低化肥使用量,促进农业可持续发展。

目前为止,解钾菌对土壤内矿化钾的分解作用已经逐渐引起了学者的重视,利用植物与解钾菌的相互作用来调节植物根际钾的有效性,将矿化钾转化为速效钾已成为当前的研究热点,但有关解钾菌对植物的促生效应研究多以马铃薯^[3]和烤烟^[8-10]等喜钾作物为主,而有关解钾菌对药用植物生长发育的影响研究尚不多见,关于解钾菌对滇重楼药材生长发育状况鲜见报道。本研究以滇重楼幼苗为指示植物,解钾菌施用量作为试验对象,研究不同剂量的钾细菌对滇重楼幼苗生长发育及药用品质的影响,寻找出滇重楼最适解钾菌接种量,为解钾菌在滇重楼栽培生产中的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试滇重楼种苗选自云南省大理州农科院滇重楼种植基地 8~10 年生大小基本一致的样品,经三峡库区道地药材绿色种植与深加工重庆市工程实验

室(重庆三峡学院)郭冬琴副教授鉴定为百合科植物滇重楼 *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* 的新鲜根茎。解钾菌购自广州市微元生物科技有限公司,其有效活菌数 $\geq 2 \times 10^{10}$ CFU/g。

1.2 实验设计

本试验采用室温盆栽法进行研究,供试土壤取自重庆三峡学院百安校区菜园的黄壤土,与干净河砂按 3:1(V:V)进行混合作为栽培基质,121 °C 高压灭菌锅内灭菌 2 h,黑暗条件下保存 1 周后装盆,每盆装土量为 16.0 kg。温室光照时间为 14 h,光照强度设置为 280 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,土壤含水量维持在田间持水量的 70%~80% 范围内。同年 6 月(T1 期)、7 月(T2 期)和 8 月(T3 期)采用灌根方式接种解钾菌,试验设不接种解钾菌作为对照(CK)和接菌处理,接种解钾菌剂量依次为 5.83 g(K1)、17.50 g(K2)和 35.00 g(K3),每盆为一个试验单元,采用随机区组进行排列,每个处理设 10 次重复,每重复 1 盆,栽种大小基本一致的滇重楼 5 株,将剩余平衡土 1 750.00 g 加入盆中覆盖幼苗,生长期按常规管理。

1.3 测定项目及方法

于同年 12 月采取滇重楼的根系作为待测样品,根据 Li^[11]的方法测定根系活力。采取滇重楼的叶片作为待测样品,根据 Lichtenthaler^[12]的方法测定叶片叶绿素(chlorophyll, Chl)和类胡萝卜素(carotenoids, Car)含量;根据 Dhindsa 等^[13]方法测定丙二醛(malondialdehyde, MDA)和可溶性糖含量;根据 Bradford^[14]的方法测定可溶性蛋白含量;根据 Fu 和 Huang^[15]的方法测定过氧化氢酶(catalase, CAT)活性;根据 Giannopolitis 等^[16]的方法测定超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)活性;根据 Choudhary^[17]的方法测定过氧化物酶(peroxidase, POD)活性。采取滇重楼的老根茎和新根茎作为待测样品,清水洗净后 45 °C 烘干至恒重,粉碎过 40 目筛,采用原子吸收光谱法测定解钾菌处理下滇重楼老根茎和新根茎内钾(K)、锰(Mn)、镁(Mg)、锌(Zn)、铅(Pb)、铜(Cu)、砷(As)和镉(Cd)的含量^[18],Pb、Cu 和 Cd 空心阴极灯购买自北京曙光电子光源仪器有限公司,Pb(批号 100808)、Cu(批号 100609)、Cd(批号 103110)标准贮备液购自国家环境保护总局标准样品研究所,其他试剂均为优级纯,水为去离子水。

1.4 数据处理

试验数据的整理分析采用 Excel 2003 软件;

SPSS 22.0 软件进行两因素方差分析,并用邓垦法比较数据间的差异,差异显著水平为 0.05;绘图采用 Origin 9.0 软件进行。

2 结果与分析

2.1 不同剂量解钾菌对滇重楼根系活力的影响

根系作为植物吸收养分的主要器官,其根系活力强弱可以直接反映植物根系吸收养分的能力。由图 1 分析可知,不同时期接种不同剂量的解钾菌均可显著提高滇重楼根系活力,T1 期和 T3 期随着解钾菌剂量的增加,其根系活力逐渐升高,其中 K3 处

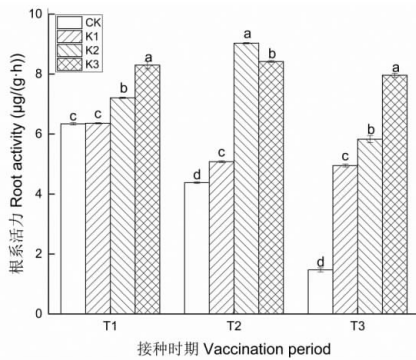


图 1 不同剂量解钾菌对滇重楼根系活力的影响

Fig. 1 The effect of different dosages potassium-dissolving bacteria on root activity in *P. polyphylla* var. *yunnanensis*
注:图中不同字母表示差异显著($P < 0.05$),下同。Note: Different lowercase letters mean significant difference at $P < 0.05$, the same below.

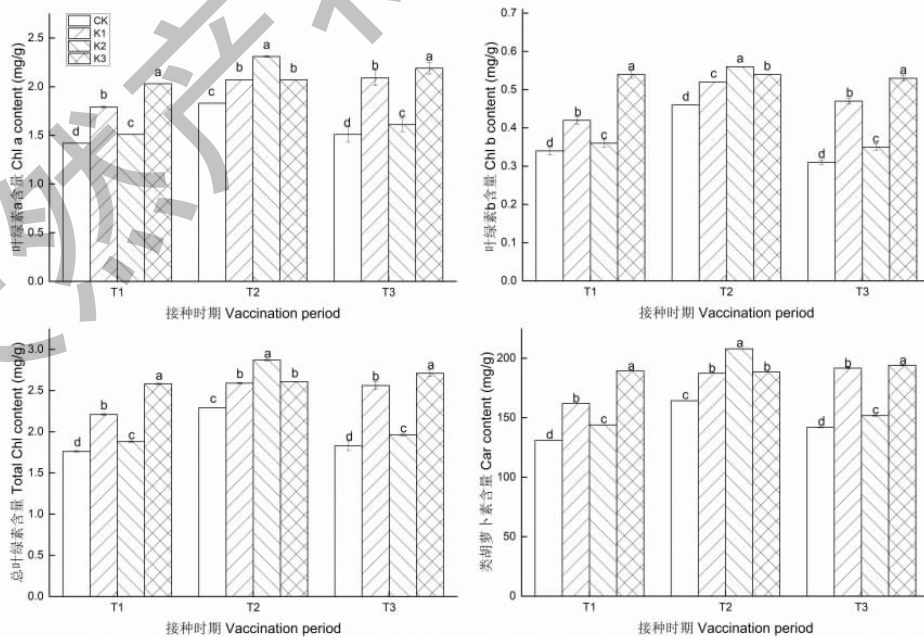


图 2 不同剂量解钾菌对滇重楼叶光合色素含量的影响

Fig. 2 The effect of different dosages potassium-dissolving bacteria on photosynthetic pigment content in *P. polyphylla* var. *yunnanensis*

理的调控效果最好,分别比 CK 依次提高了 30.99% 和 440.53% ($P < 0.05$);T2 期接种 K2 的调控效果最佳,与 CK 相比,根系活力升高了 106.16% ($P < 0.05$)。总而言之,于滇重楼苗期接种 35.00 g(K3) 解钾菌对根系活力的调控效果最好,而接种 17.50 g (K2) 解钾菌的调控效果次之。

2.2 不同剂量解钾菌对滇重楼叶片生理特性的影响

2.2.1 不同剂量解钾菌对滇重楼叶片光合色素含量的影响

Chl 和 Car 作为植物光合作用的主要色素,其含量变化与植物的生长发育和生存密切相关。试验结果表明(见图 2),于滇重楼不同时期接种不同剂量的解钾菌均可促进叶片内 Chl 和 Car 含量的增加,其中,Chl a 含量的增长幅度依次为 6.62% ~ 43.11%、13.07% ~ 26.13% 和 6.33% ~ 44.33%, Chl b 含量的增长幅度依次为 6.82% ~ 59.98%、16.61% ~ 21.32% 和 12.20% ~ 69.39%, Chl a + b 含量的增长幅度依次为 6.66% ~ 46.37%、13.10% ~ 25.17% 和 7.33% ~ 48.61%, Car 含量的增长幅度依次为 9.97% ~ 44.59%、14.09% ~ 26.57% 和 6.96% ~ 36.65%,经方差分析可知,处理与 CK 间差异均达显著水平($P < 0.05$)。总体而言,于滇重楼幼苗期接种 35.00 g(K3) 解钾菌对叶片光合色素含量的调控效果最好。

2.2.2 不同剂量解钾菌对滇重楼叶片丙二醛含量的影响

由图3分析可知,不同时期接种不同剂量的解钾菌可显著降低滇重楼叶片内MDA含量,其中,与CK相比,T2期各处理叶片内MDA含量依次减少了13.63%、19.52%和29.21%,T3期各处理叶片内MDA含量依次减少了54.49%、60.77%和83.40%,方差分析可知,处理与CK间差异显著($P < 0.05$)。T1期接种解钾菌虽然显著降低了叶片内MDA含量,但是不存在剂量效应。总而言之,于滇重楼苗期接种35.00 g(K3)解钾菌对叶片内MDA含量的抑制效果最佳,而接种17.50 g(K2)解钾菌的抑制效果次之。

2.2.3 不同剂量解钾菌对滇重楼叶片可溶性蛋白和可溶性糖含量的影响

不同时期接种不同剂量的解钾菌对滇重楼叶片内可溶性蛋白和可溶性糖含量的调控效果如表1所示,随着接种时期的延长,叶片内可溶性蛋白质含量

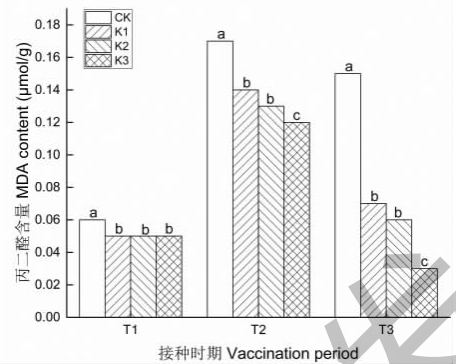


图3 不同剂量解钾菌对滇重楼丙二醛含量的影响
Fig. 3 The effect of different dosages potassium-dissolving bacteria on MDA content in *P. polyphylla* var. *yunnanensis*

的增长幅度依次为6.40%~13.80%、5.94%~17.46%和9.06%~21.86%,可溶性糖含量的增长幅度依次为0.94%~30.18%、5.38%~9.19%和21.40%~32.23%,方差分析可知,除T1期K3处理外,其余处理与CK之间差异均达显著水平($P < 0.05$)。

表1 不同剂量解钾菌对滇重楼可溶性蛋白和可溶性糖含量的影响

Table 1 The effect of different dosages potassium-dissolving bacteria on soluble protein and soluble sugar content in *P. polyphylla* var. *yunnanensis*

处理方式 Treatment	采样时间 Time	可溶性蛋白含量 Soluble protein content (mg/g)	可溶性糖含量 Soluble sugar content (mg/g)
CK	T1	1.07 ± 0.01 ^c	0.48 ± 0.01 ^b
	T2	1.06 ± 0.01 ^c	0.48 ± 0.03 ^a
	T3	1.10 ± 0.00 ^d	0.61 ± 0.03 ^c
K1	T1	1.14 ± 0.01 ^b	0.51 ± 0.02 ^b
	T2	1.24 ± 0.02 ^a	0.52 ± 0.03 ^a
	T3	1.27 ± 0.00 ^b	0.81 ± 0.07 ^a
K2	T1	1.22 ± 0.03 ^a	0.63 ± 0.02 ^a
	T2	1.12 ± 0.02 ^b	0.53 ± 0.02 ^a
	T3	1.20 ± 0.00 ^c	0.74 ± 0.03 ^b
K3	T1	1.16 ± 0.01 ^b	0.48 ± 0.01 ^b
	T2	1.22 ± 0.00 ^a	0.51 ± 0.03 ^a
	T3	1.34 ± 0.00 ^a	0.78 ± 0.05 ^{ab}

注:每组同列不同的小写字母代表0.05水平上显著性差异,下同。

Note: Different lowercase letters on the same column of each group represented significant difference at $P < 0.05$; The same below.

2.2.4 不同剂量解钾菌对滇重楼叶片保护酶活性的影响

由表2分析可知,不同时期接种不同剂量的解钾菌导致叶片内抗氧化酶活性(CAT、SOD和POD)不同程度地降低,其中,T1期上述抗氧化酶活性下降幅度依次为9.46%~63.63%、30.39%~

51.78%和1.71%~61.90%,方差分析可知,除K1处理的滇重楼叶片内POD酶活性与CK间差异不显著外,其余处理与CK之间差异均达显著水平($P < 0.05$)。T2期上述抗氧化酶活性下降幅度依次为2.79%~11.19%、17.22%~58.63%和3.52%~28.65%,方差分析可知,除K1处理的滇重楼叶片

内 CAT 酶活性以及 K3 处理的滇重楼叶片内 POD 酶活性与 CK 间差异不显著外,其余处理与 CK 之间差异均达显著水平 ($P < 0.05$)。T3 期上述抗氧化酶活性下降幅度依次为 5.75% ~ 49.72%、57.53%

~83.79% 和 12.46% ~ 24.03%, 方差分析可知, 处理与 CK 间差异显著 ($P < 0.05$)。总体而言, 各时期接种 35.00 g(K3) 解钾菌对抗氧化酶活性的调控效果最佳, 而接种 17.50 g(K2) 解钾菌的调控效果次之。

表 2 不同剂量解钾菌对滇重楼保护酶活性的影响

Table 2 The effect of different dosages potassium-dissolving bacteria on protect enzyme activities in *P. polyphylla* var. *yunnanensis*

处理方式 Treatment	采样时间 Time	CAT 活性 CAT activity(U/g)	SOD 活性 SOD activity(U/g)	POD 活性 POD activity(U/g)
CK	T1	156.92 ± 6.51 ^a	327.91 ± 13.01 ^a	3788.08 ± 24.17 ^a
	T2	101.06 ± 4.61 ^a	585.40 ± 13.24 ^a	2067.40 ± 6.91 ^a
	T3	114.59 ± 0.74 ^a	885.37 ± 4.75 ^a	3024.51 ± 13.06 ^a
K1	T1	139.78 ± 6.18 ^a	215.98 ± 9.95 ^b	3723.36 ± 11.82 ^b
	T2	98.24 ± 5.47 ^a	484.57 ± 14.94 ^b	1475.19 ± 68.81 ^b
	T3	109.12 ± 1.53 ^b	376.03 ± 54.86 ^b	2647.70 ± 16.13 ^b
K2	T1	57.07 ± 1.54 ^b	158.12 ± 13.06 ^c	3158.67 ± 8.45 ^c
	T2	93.59 ± 6.43 ^a	242.19 ± 5.35 ^c	1691.59 ± 47.02 ^b
	T3	57.62 ± 0.27 ^c	241.44 ± 54.59 ^c	2504.32 ± 34.34 ^{bc}
K3	T1	142.08 ± 21.07 ^a	228.26 ± 27.11 ^b	1443.16 ± 13.07 ^d
	T2	89.75 ± 2.92 ^a	106.75 ± 3.32 ^d	1994.69 ± 26.89 ^a
	T3	108.00 ± 2.22 ^b	143.54 ± 18.72 ^c	2297.59 ± 68.14 ^c

2.3 不同剂量解钾菌对滇重楼根茎内元素含量的影响

2.3.1 不同剂量解钾菌对滇重楼根茎内钾含量的影响

从图 4 的结果来看, 不同时期接种不同剂量的解钾菌均可增加滇重楼老根茎和新根茎内的钾含

量, 其中, 各时期接种 35.00 g(K3) 解钾菌的调控效果最显著, 与 CK 相比, 随着接种时期的延长, 老根茎的增长率依次为 167.54%、47.30% 和 73.83%, 新根茎的增长率依次为 157.78%、72.30% 和 20.42%, 方差分析可知, 处理与 CK 间差异均达显著水平 ($P < 0.05$)。

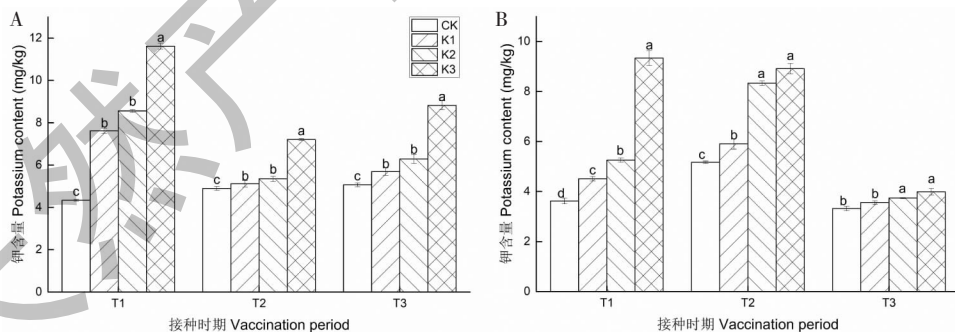


图 4 不同剂量解钾菌对滇重楼根茎内钾元素含量的影响

Fig. 4 The effect of different dosages potassium-dissolving bacteria on potassium content in rhizome of *P. polyphylla* var. *yunnanensis*

注: A 代表老根茎; B 代表新根茎。Note: A represents the old rhizome; B represents the new rhizome.

2.3.2 不同剂量解钾菌对滇重楼根茎内营养元素含量的影响

由表 3 可知, 不同时期接种不同剂量的解钾菌对滇重楼老根茎和新根茎内 Mn、Mg 和 Zn 含量均起

到促进作用。总体来看, 解钾菌对新根茎内营养元素含量的调控效果好于老根茎; 随着接种解钾菌剂量的增加, 老根茎和新根茎内上述营养元素含量的增长幅度逐渐升高, 这说明各时期接种 35.00 g

(K3)解钾菌对根茎内营养元素含量的调控效果最佳,其中,滇重楼老根茎内 Mn 含量最高可达到 0.57 g/kg(T1-K3 处理)、Mg 含量最高可达到 20.08 g/kg(T1-K3 处理)、Zn 含量最高可达到 0.43 g/kg(T2-K3 处理),新根茎内 Mn 含量最高可达到 0.19 g/kg

(T1-K3 和 T2-K3 处理)、Mg 含量最高可达到 22.86 g/kg(T1-K3 处理)、Zn 含量最高可达到 0.76 g/kg(T1-K3 处理),接种 17.50 g(K2)解钾菌的调控效果次之。

表 3 不同剂量解钾菌对滇重楼营养元素含量的影响

Table 3 The effect of different dosages potassium-dissolving bacteria on nutrient element content in *P. polyphylla* var. *yunnanensis*

接种时期 Time	取样部位 Location	处理方式 Treatments	Mn 含量 Mn content(g/kg)	Mg 含量 Mg content(g/kg)	Zn 含量 Zn content(g/kg)
T1	老根茎 Old roots	CK	0.13 ± 0.00 ^c	2.83 ± 0.16 ^d	0.13 ± 0.00 ^c
		K1	0.29 ± 0.01 ^b	4.26 ± 0.21 ^c	0.32 ± 0.03 ^a
		K2	0.56 ± 0.10 ^a	7.46 ± 0.16 ^b	0.28 ± 0.02 ^{ab}
		K3	0.57 ± 0.09 ^a	20.08 ± 0.03 ^a	0.24 ± 0.00 ^b
	新根茎 New roots	CK	0.07 ± 0.00 ^c	10.08 ± 0.21 ^d	0.19 ± 0.01 ^c
		K1	0.16 ± 0.03 ^b	61.37 ± 0.18 ^a	0.23 ± 0.01 ^c
		K2	0.14 ± 0.06 ^b	14.56 ± 0.20 ^c	0.34 ± 0.04 ^b
		K3	0.19 ± 0.01 ^a	22.86 ± 0.41 ^b	0.76 ± 0.06 ^a
T2	老根茎 Old roots	CK	0.17 ± 0.02 ^d	3.10 ± 0.04 ^b	0.25 ± 0.01 ^d
		K1	0.28 ± 0.01 ^b	3.30 ± 0.09 ^b	0.54 ± 0.05 ^a
		K2	0.21 ± 0.01 ^c	3.13 ± 0.10 ^b	0.30 ± 0.00 ^c
		K3	0.34 ± 0.03 ^a	5.80 ± 0.40 ^a	0.43 ± 0.03 ^b
	新根茎 New roots	CK	0.18 ± 0.08 ^c	3.48 ± 0.27 ^c	0.28 ± 0.01 ^c
		K1	0.47 ± 0.05 ^a	9.81 ± 0.11 ^b	1.12 ± 0.10 ^a
		K2	0.28 ± 0.00 ^b	13.43 ± 0.17 ^a	0.65 ± 0.05 ^b
		K3	0.19 ± 0.03 ^c	13.16 ± 0.04 ^a	0.66 ± 0.08 ^b
T3	老根茎 Old roots	CK	0.16 ± 0.01 ^c	5.82 ± 0.12 ^c	0.08 ± 0.00 ^d
		K1	0.21 ± 0.02 ^b	7.93 ± 0.11 ^b	0.17 ± 0.01 ^c
		K2	0.32 ± 0.06 ^a	14.10 ± 0.20 ^a	0.30 ± 0.03 ^a
		K3	0.28 ± 0.02 ^{ab}	13.64 ± 0.08 ^a	0.26 ± 0.07 ^b
	新根茎 New roots	CK	0.09 ± 0.00 ^b	2.39 ± 0.05 ^c	0.12 ± 0.00 ^c
		K1	0.10 ± 0.01 ^{ab}	8.13 ± 0.18 ^a	0.37 ± 0.04 ^a
		K2	0.11 ± 0.00 ^a	3.64 ± 0.21 ^b	0.14 ± 0.01 ^c
		K3	0.10 ± 0.00 ^{ab}	3.20 ± 0.09 ^b	0.21 ± 0.00 ^b

2.3.3 不同剂量解钾菌对滇重楼根茎内重金属含量的影响

由表 4 分析可知,不同时期接种不同剂量解钾菌可显著降低滇重楼老根茎和新根茎内的重金属(Pb、Cu、As 和 Cd)含量,对于老根茎而言,T1 期上述重金属含量依次降低了 58.40% ~ 72.59%、25.59% ~ 37.16%、22.69% ~ 44.11% 和 10.44% ~ 19.69%,T2 期上述重金属含量依次降低了 21.91%

~ 39.80%、63.78% ~ 86.02%、24.29% ~ 35.72% 和 6.87% ~ 22.49%,T3 期上述重金属含量依次降低了 64.37% ~ 76.31%、53.18% ~ 78.86%、13.84% ~ 26.09% 和 4.19% ~ 63.26%,方差分析可知,除 T3 期 K1 处理 Cd 含量外,其余处理与 CK 间差异均达显著水平($P < 0.05$)。对于新根茎而言,T1 期上述重金属含量依次降低了 22.23% ~ 64.17%、61.70% ~ 87.23%、21.34% ~ 51.72% 和

15.53% ~ 42.17%, T2 期上述重金属含量依次降低了 29.02% ~ 63.75%、26.98% ~ 68.93%、24.57% ~ 38.79% 和 46.56% ~ 62.94%, T3 期上述重金属含量依次降低了 67.97% ~ 82.95%、76.43% ~

99.52%、6.48% ~ 14.47% 和 8.37% ~ 25.03%, 总体而言,解钾菌对滇重楼新根茎内重金属含量的调控效果好于老根茎。

表 4 不同剂量解钾菌对滇重楼重金属含量的影响

Table 4 The effect of different dosages potassium-dissolving bacteria on heavy metal content in *P. polyphylla* var. *yunnanensis*

接种时期 Time	取样部位 Location	处理方式 Treatments	Pb 含量 Pb content (mg/kg)	Cu 含量 Cu content (mg/kg)	As 含量 As content (mg/kg)	Cd 含量 Cd content ($\mu\text{g}/\text{kg}$)
T1	老根茎 Old roots	CK	1.41 ± 0.05 ^c	0.14 ± 0.03 ^a	1.67 ± 0.05 ^a	13.83 ± 0.15 ^a
		K1	0.39 ± 0.06 ^c	0.09 ± 0.00 ^c	0.93 ± 0.07 ^b	12.39 ± 0.21 ^a
		K2	0.49 ± 0.10 ^b	0.10 ± 0.00 ^b	1.29 ± 0.11 ^a	11.11 ± 0.43 ^c
		K3	0.59 ± 0.09 ^a	0.09 ± 0.01 ^c	1.27 ± 0.09 ^a	11.82 ± 0.05 ^b
	新根茎 New roots	CK	1.29 ± 0.02 ^d	0.85 ± 0.01 ^d	1.88 ± 0.06 ^c	19.18 ± 0.09 ^a
		K1	1.00 ± 0.01 ^a	0.11 ± 0.04 ^c	1.48 ± 0.12 ^a	11.09 ± 0.61 ^c
		K2	0.46 ± 0.05 ^c	0.26 ± 0.05 ^b	0.91 ± 0.07 ^b	14.44 ± 0.38 ^b
		K3	0.55 ± 0.00 ^b	0.32 ± 0.03 ^a	0.96 ± 0.05 ^b	16.20 ± 0.27 ^b
T2	老根茎 Old roots	CK	0.61 ± 0.03 ^a	0.97 ± 0.01 ^b	1.90 ± 0.03 ^c	15.45 ± 0.09 ^a
		K1	0.37 ± 0.02 ^c	0.35 ± 0.03 ^a	1.44 ± 0.10 ^a	11.98 ± 0.21 ^c
		K2	0.34 ± 0.10 ^c	0.14 ± 0.00 ^c	1.39 ± 0.09 ^a	14.39 ± 0.17 ^b
		K3	0.48 ± 0.09 ^b	0.14 ± 0.01 ^c	1.22 ± 0.02 ^b	14.19 ± 0.20 ^b
	新根茎 New roots	CK	0.75 ± 0.05 ^a	0.74 ± 0.00 ^c	1.69 ± 0.15 ^a	30.78 ± 0.15 ^a
		K1	0.54 ± 0.03 ^b	0.54 ± 0.10 ^a	1.27 ± 0.11 ^b	16.45 ± 0.02 ^b
		K2	0.27 ± 0.02 ^c	0.23 ± 0.01 ^b	1.06 ± 0.05 ^c	14.36 ± 0.02 ^b
		K3	0.29 ± 0.00 ^c	0.23 ± 0.04 ^b	1.03 ± 0.03 ^c	11.41 ± 0.21 ^c
T3	老根茎 Old roots	CK	1.54 ± 0.11 ^a	0.09 ± 0.00 ^a	1.83 ± 0.09 ^b	16.01 ± 0.14 ^a
		K1	0.51 ± 0.06 ^a	0.02 ± 0.03 ^c	1.35 ± 0.12 ^c	15.34 ± 0.21 ^a
		K2	0.36 ± 0.05 ^b	0.04 ± 0.01 ^b	1.57 ± 0.08 ^a	5.88 ± 0.20 ^b
		K3	0.55 ± 0.05 ^a	0.03 ± 0.00 ^{bc}	1.45 ± 0.02 ^b	6.62 ± 0.43 ^b
	新根茎 New roots	CK	1.42 ± 0.06 ^a	0.53 ± 0.01 ^b	1.37 ± 0.20 ^a	13.51 ± 0.07 ^a
		K1	0.24 ± 0.03 ^c	0.01 ± 0.00 ^b	1.17 ± 0.16 ^c	12.38 ± 0.31 ^{ab}
		K2	0.33 ± 0.01 ^b	0.13 ± 0.04 ^a	1.26 ± 0.09 ^b	10.13 ± 0.32 ^c
		K3	0.45 ± 0.01 ^a	0.01 ± 0.00 ^b	1.28 ± 0.10 ^b	11.89 ± 0.27 ^b

3 讨论

3.1 解钾菌对植物生理特性的影响

大量施用化肥虽然提高了作物产量,但也带来了诸多问题,如生态环境恶化、化肥利用率降低、土壤微生物区系单一化等。而解钾菌作为植物根际促生细菌,不仅对植物生长发育起到促进作用,还能够起到生物防治的作用,含有解钾菌的生物菌肥具有固氮、解钾及分泌植物激素等生理活性^[9],在一定程度上可替代化肥、农药等用于农业生产中^[19]。本研究结果表明,滇重楼苗期接种解钾菌使其根系活力增强,促进了滇重楼根系对土壤中营养

物质的吸收和运输功能,这有利于滇重楼的整体生长,与 Li 等^[10]在烤烟和 Shi 等^[20]在棉花上的调节效果相同。解钾菌对滇重楼根系活力的调控效果存在剂量效应,于滇重楼苗期接种 35.00 g(K3)解钾菌对根系活力的调控效果最好,而接种 17.50 g(K2)解钾菌的调控效果次之。

Chl 和 Car 作为叶绿体类囊体内的光合色素是植物进行光合作用的主要场所,其含量高低直接影响植物光合作用情况。前人研究发现^[10,21],在一定的施肥量或土壤肥力条件下,当解钾菌作为生物肥施用可以促进植物叶片内光合色素的合成,延缓光

合色素的降解,进而提高叶片的光合色素含量,本研究结果也说明了这个问题。相似的研究结果在烤烟^[10]、核桃^[21]等植物中也均得到了证实。

MDA 含量的变化情况可以衡量植物细胞脂质过氧化程度,当植物体内 MDA 含量被抑制时,说明此时植物的细胞膜系统比较稳定,这有利于提高植物叶片内细胞的生理活性。植物生长发育过程中,叶片内渗透调节物质(可溶性蛋白和可溶性糖)含量的增加有利于细胞代谢速度的加快,而叶片内保护酶活性降低说明植物体内的活性氧积累量被抑制,这可以减轻不利环境因素造成的氧化伤害^[22],进而促进植物的生长发育,在宿主的生理代谢上通过渗透调节和抗氧化防御系统来提高植物的抗逆性^[23],可培育具有较强生理活性和较好抗逆性的健壮幼苗。本研究结果表明,滇重楼苗期接种不同剂量的解钾菌可使其叶片内的 MDA 含量减少,可溶性蛋白和可溶性糖含量增加,而 CAT、SOD 和 POD 活性降低,这说明外源接种解钾菌维持了滇重楼叶片内细胞膜系统的稳定,加快了细胞代谢速度,避免了不利环境因素对植株造成的氧化损伤,进而促进滇重楼植株的生长发育,这与棉花种子萌发^[24]和核桃一年生容器苗^[21]中的观察结果相一致。不同时期接种不同剂量的解钾菌对滇重楼叶片生理特性的调控效果不同,其中,于滇重楼苗期接种 35.00 g (K3)解钾菌对叶片生理特性的调控效果最好,而接种 17.50 g(K2)解钾菌的调控效果次之。

3.2 解钾菌对植物体内元素含量的影响

钾作为植物生长中需求量较大的矿质元素,是植物生长所需养分的有效来源,在植物体内以离子态或可溶态钾盐形态存在而被重复利用,对植物体内的许多酶具有“激活”作用,植物体内钾含量的增加不仅可以提高植物光合速率和酶的活化速度,还能够增加植物可溶性糖和可溶性蛋白含量,促进植物产量的升高和抗逆性的加强,植物体内的钾主要来源于土壤,而土壤的钾素多以固定钾和矿物钾的形式存在,不能直接被植物根系吸收,这成为了制约植物生长所需钾素营养的一大阻碍。解钾菌作为土壤中常见的解钾微生物,可以直接对土壤中矿化钾进行转化分解,其分解所产生的速效钾养分可以被植物根系直接吸收,不仅为植物光合作用的顺利进行奠定了物质基础,还决定了植物的生长发育状态。本研究结果表明,不同时期接种不同剂量的解钾菌均可显著增加滇重楼老根茎和新根茎内的钾含量,

其中,35.00 g(K3)解钾菌的调控效果最佳,根茎中钾素含量的提高说明了解钾菌的施用促进了土壤中矿化钾转化为速效钾,为植物体内钾素含量的增加奠定了基础。这与烟草幼苗接种不同特异性根际解钾菌^[25]或者将解钾菌液与枸溶性钾肥配施^[10]均会促进叶片内钾含量的积累研究结果相一致,可见,外源接种解钾菌促进植物体内钾素积累已是不争的事实。

重楼药材的多种药理活性与其根茎内的矿质营养元素含量密切相关,如高含量的 Mg 能提高机体免疫力;Zn 和 Ca 含量可能与重楼的生肌、止血、消炎作用有关^[26]。中药材内的重金属超标问题已成为中药国际化过程的重要障碍而广受国内外的普遍关注,使用重金属药材会直接影响患者临床用药的安全和疗效,土壤中的重金属经药用植物吸收后通过食物链进入体内,进而危害人体健康^[1]。近年来根际促生菌调控植物元素吸收和转运,促进植物体内营养元素含量升高,降低其可食部分重金属累积的研究结果相继被报道^[27,28]。Zhang 等^[27]于滇重楼苗期接种不同丛植菌根真菌(AMF),发现接种不同 AMF 可增加果熟期重楼药材中 Mg 和 Zn 含量,并能降低重金属 Cu 含量;Li 等^[28]于翅莖木苗期接种 AMF,发现外源接种 AMF 能够降低翅莖木体内 Zn 浓度,同时增加 Zn 的累积量。本研究结果表明,不同时期接种不同剂量的解钾菌对滇重楼老根茎和新根茎内 Mn、Mg 和 Zn 含量均起到促进作用,而对重金属 Pb、Cu、As 和 Cd 含量则起到抑制作用,并且解钾菌对新根茎内营养元素和重金属含量的调控效果好于老根茎。滇重楼根茎内 Pb 最高含量为 1.54 g/kg、Cu 最高含量为 0.97 mg/kg、As 最高含量为 1.88 mg/kg、Cd 最高含量为 30.78 mg/g,根据中国对外贸易绿色行业标准《药用植物及制剂进出口绿色行业标准》和 2015 版《中国药典》限量标准规定,滇重楼药材限量标准为 Pb ≤ 5.0 mg/kg、Cu ≤ 20.0 mg/kg、As ≤ 2.0 mg/kg 和 Cd ≤ 0.3 mg/kg^[29],滇重楼中重金属 Pb、Cu、As 和 Cd 含量均符合重金属限量标准,这说明外源接种解钾菌可以降低重金属含量,改善滇重楼根茎的药用价值,这为滇重楼药材质量评价及道地药材生产发展提供了理论依据。

4 结论

与 CK 相比,滇重楼苗期接种解钾菌可显著提高其根系活力,促进叶片内 Chl、Car、可溶性蛋白和可溶性糖含量的增加,降低叶片内保护酶(SOD、

POD 和 CAT) 活性以及 MDA 含量, 可见, 滇重楼苗期接种解钾菌可以有效地维持细胞膜系统的稳定性, 进而促进滇重楼植株的生长发育。其中, 接种 35.00 g 解钾菌对滇重楼幼苗生长的促进效果最佳, 17.50 g 解钾菌的调控效果次之。滇重楼苗期接种解钾菌可以使老根茎和新根茎内的钾含量显著升高, 促进老根茎和新根茎内营养元素 Mn、Mg 和 Zn 含量的增加, 而重金属 Pb、Cu、As 和 Cd 含量普遍降低, 这说明滇重楼苗期接种解钾菌可以促进其根茎内有益营养元素的积累, 降低重金属含量, 提高滇重楼根茎的药用价值。

参考文献

- Zhang H, Du HH, Guo DQ, et al. Effects of inoculation with different AM fungi on functional gene expression in seedling of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* [J]. Nat Prod Res Dev (天然产物研究与开发), 2019, 31: 318-324.
- Zhou N, Zhang J, Pan X J, et al. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on endogenous hormones in *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* [J]. Chin Tradit Herb Drugs (中草药), 2017, 48: 4970-4978.
- Ma N, Li C, Sun T, et al. Effects of potassium bacteria on soil nutrient transformation and potato quality [J]. Chin Potato J (中国马铃薯), 2016, 30: 218-225.
- Chen YF, Ke CL, Zhou DB, et al. Screening, identification and potassium-dissolving characteristics of potassium-dissolving actinomycete in banana rhizosphere soil [J]. Biotechnol Bull (生物技术通报), 2015, 31(6): 129-137.
- Sun LF. Conversion of spent mushroom substrate to biofertilizer using co-inoculation of salt- and alkaline-tolerant phosphate-solubilizing fungus, potassium solubilizing and nitrogen fixing bacteria [D]. Tianjin: Tianjin University (天津大学), 2012.
- Sturz AV, Christie BR, Nowak J. Bacterial endophytes: Potential role in developing sustainable systems of crop production [J]. Crit Rev Plant Sci, 2000, 19(1): 1-30.
- Sugumaran P, Janarthanam B. Solubilization of potassium containing minerals by bacteria and their effect on plant growth [J]. World J Agr Sci, 2007, 3: 350-355.
- Xiao S. Effects of applying different types of silicate bacteria on the economic characters and chemical components of tobacco leaves [J]. J Anhui Agr Sci (安徽农业科学), 2017, 45(3): 46-48.
- Liu XQ, Du XR, Tan YJ, et al. The effects of different ratios between phosphate-solubilizing bacteria and potassium-solubilizing bacteria fertilizers on the flue-cured tobacco growth and the enzyme activities in the rhizospheric soil [J]. J Yunnan Agr Univ: Nat Sci (云南农业大学学报: 自科版), 2019, 34: 845-851.
- Li X, Zhou JH, Li Q, et al. Application of citrate soluble potassium fertilizer combined with potassium dissolving bacteria on growth and potassium nutrition of fluecured tobacco [J]. Tobacco Sci Technol (烟草科技), 2016, 49(11): 1-6.
- Li HS. Principles and Techniques of Plant Physiology and Biochemistry Experiments (植物生理生化实验原理与技术) [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- Lichtenthaler HK. Chlorophylls and carotenoids-pigments of photosynthetic biomembranes [J]. Method Enzymol, 1987, 148: 350-382.
- Dhindsa RS, Plumb-Dhindsa P, Thorpe T. Leaf senescence: correlated with increased levels of membrane permeability and lipid peroxidation, and decreased levels of superoxide dismutase and catalase [J]. J Exp Bot, 1981, 32: 93-101.
- Bradford MM. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding [J]. Anal Biochem, 1976, 72: 248-254.
- Fu J, Huang B. Involvement of antioxidants and lipid peroxidation in the adaptation of two cool-season grasses to localized drought stress [J]. Environ Expe Bot, 2001, 45: 105-124.
- Giannopolitis CN, Ries SK. Superoxide dismutases: I. Occurrence in higher plants [J]. Plant Physiol, 1977, 59: 309-314.
- Choudhary DK. Plant growth-promotion (PGP) activities and molecular characterization of rhizobacterial strains isolated from soybean (*Glycine max* L. Merrill) plants against charcoal rot pathogen *Macrophomina phaseolina* [J]. Biotechnol Lett, 2011, 33: 2287-2295.
- Liu YM. Determination of ten trace elements in Chinese traditional medicines by atomic absorption spectrometry [J]. Spectrosc Spect Anal (光谱学与光谱分析), 2000, 20: 373-375.
- Zhao Q, Shen Q, Ran W, et al. Inoculation of soil by *Bacillus subtilis* Y-IVI improves plant growth and colonization of the rhizosphere and interior tissues of muskmelon (*Cucumis melo* L.) [J]. Biol Fert Soils, 2011, 47: 507-514.
- Shi JJ, Liu JY, Han GM, et al. The physiological activities and growth-promoting effects of K-releasing bacteria of cotton [J]. Soil Fertil Sci China (中国土壤与肥料), 2012(4): 87-90.
- Bao J, Liu GQ, Yu WD, et al. Effect of bacterial manure on the growth of Changshan walnut container seedlings [J]. J Anhui Agr Univ (安徽农业大学学报), 2015, 42(1): 56-

- 59.
- 22 Cheng LL, Pan Y, Lin Y, et al. Effect of low nitrogen stress on the growth, physiological, and biochemical characteristics of different *Betula luminifera* genotypes [J]. J Nucl Agr Sci (核农学报), 2020, 34:2435-2443.
- 23 Fracheboud Y, Jompuk C, Ribaut JM, et al. Genetic analysis of cold-tolerance of photosynthesis in maize [J]. Plant Mol Biol, 2004, 56:241-253.
- 24 Wu JL, Luo XG, Li BQ, et al. Isolation of *Bacillus mucilaginosus* and its influence on cotton seed germination in the desert sand [J]. Agr Res Arid Areas (干旱地区农业研究), 2015, 33(6):77-82.
- 25 Cao YY, Zhang LN, Guo TT, et al. Effects of potassium-releasing rhizobacteria on the growth and potassium absorption of tobacco plants [J]. J Anhui Agr Univ (安徽农业大学学报), 2019, 46(1):141-145.
- 26 Li XZ, Yu CG, Bai Y. Analysis of trace elements in Beizhonglou [J]. Heilongjiang Med (黑龙江医药), 1995, 8:328-329.
- 27 Zhang HZ, Li Y, Zhang YR, et al. Absorption and accumulation of mineral elements by *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* with different arbuscular mycorrhizal fungi [J]. Environ Chem (环境化学), 2019, 38:615-625.
- 28 Li X, Peng XW, Wu SL, et al. Effect of arbuscular mycorrhizae on growth, heavy metal uptake and accumulation of *Zenia insignis* Chun seedlings [J]. Environ Chem (环境化学), 2014, 35:3142-3148.
- 29 Zhou N, Zhang DW, Guo DQ, et al. Effect of the arbuscular mycorrhiza fungi on heavy metals in *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* by artificial cultivation [J]. Chin Tradit Pat Med (中成药), 2014, 36:2583-2586.

基于蛇毒提取物的超级止血粘合剂的发现

蛇毒可以伤人,也可以救人。它的主要毒性(活性)成分是蛋白质,根据作用部位及原理不同一般分为神经毒素、心脏毒素、凝血毒素、出血毒素等。研究人员分离和研究了多种毒蛇的毒液,目前基于蛇毒毒素也开发出了多种抗癌、镇痛、抗血栓的药物。

受蛇毒凝血功能的启发,来自陆军军医大学西南医院联合加拿大曼尼托巴大学的研究团队将从巴西矛头蝮 *Bothrops atrox* 的毒液中提取的血凝酶(hemocoagulase, HC)引入明胶-甲基丙烯酸凝胶(GelMA),研发了一种可见光诱导的超级止血粘合剂(hemostatic adhesive, HAD)。这种 HAD 生物胶水可在 430 至 530 nm 的可见光作用下迅速诱导血小板活化并聚集,并有效地将纤维蛋白原转化为纤维蛋白,像胶水一样通过涂抹的方式施用之后可以实现快速止血和组织封闭。HAD 还可有效闭合严重受损的肝脏和腹主动脉,具有巨大的医学应用潜力。相关研究成果近日已发表在《Science Advances》上。

胡乃华编译自:<https://advances.sciencemag.org/content/7/29/eabf9635>

原标题:Snake extract-laden hemostatic bioadhesive gel cross-linked by visible light