

基于固碳效应的绿地优化配置研究——以黑龙江省哈尔滨市为例

李海燕, 高玉慧*, 罗春雨, 曲艺, 张弘强, 崔玲, 曾星雨

(黑龙江省科学院自然与生态研究所湿地与生态保育国家地方联合工程实验室, 黑龙江哈尔滨 150040)

摘要 按照乔-灌-草、乔-灌、乔-草、灌-草、乔木、灌木和草本不同配置结构, 对哈尔滨市主城区 113 块样地固碳效应进行研究, 通过植物实际监测, 计算了哈尔滨市 20 种常用绿化植物的固碳效应, 并对不同配置结构绿地固碳效应进行比较。结果表明: 乔木中糖槭、榆树、银中杨、垂榆, 灌木中接骨木、黄刺梅都是固碳能力较强的园林绿化树种, 在园林绿化中可优先考虑。不同配置结构的绿地单位面积固碳量从高到低依次为乔-灌-草、乔-灌、乔-草、乔木、灌-草、灌木、草本, 其中, 乔-灌-草的配置能够充分利用地上、地下空间, 最大限度发挥其固碳效应, 可以充分发挥单位绿地面积的固碳潜力。

关键词 绿地; 固碳效应; 优化配置; 绿化植物

中图分类号 S731.2 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2018)01-0074-04

Optimal Allocation of Urban Green Space Based on the Carbon Sequestration Capacity—Taking Harbin, Heilongjiang as an Example
LI Hai-yan, GAO Yu-hui, LUO Chun-yu et al (National and Provincial Joint Engineering Laboratory of Wetlands and Ecological Conservation, Institute of Natural Resources and Ecology, Heilongjiang Academy of Sciences, Harbin, Heilongjiang 150040)

Abstract According to the different configuration structure of arbor-shrub-grass, arbor-shrub, arbor-grass, shrub-grass, arbor, shrub, grass, the study of the carbon sequestration effect in Harbin City 113 plots, through actual plant monitoring, carbon sequestration effect of 20 kinds of greening plants in Harbin city were calculated and compared for the different structure of green space effect of carbon sequestration. The results showed that some planting trees such as *Acer negundo* Linn., *Ulmus pumila* Linn., *Populus alba* ‘Berolinensis’ and *Ulmus pumila* L. ‘Tenue’ and some planting shrub like *Sambucus williamsii* Hance, *Rose acicularis* Lindl. were species with strong carbon sequestration capacity, which can be give priority to landscaping. The carbon sequestration capacity per unit area of green space of different configuration from high to low showed arbor-shrub-grass, arbor-shrub, arbor-grass, shrub-grass, arbor, shrub, grass. Rational configuration of arbor-shrub-grass can be used to take full advantage of over-ground and under-ground space and to promote the carbon sequestration potential per unit area of green space.

Key words Green space; Carbon storage; Optimal allocation; Green plant

近年来, 全球气候变化及其产生的危害严重影响了经济社会的可持续发展, 因此减少以二氧化碳为主的温室气体排放刻不容缓。森林碳汇是目前国际社会公认的应对气候变化最经济、最有效的途径, 而城市绿地作为城市景观要素中的绿色斑块体, 研究其固碳效应就显得尤为重要。城市绿地的固碳效应, 其本质是以乔、灌、草等不同配置结构绿地, 通过利用植物光合作用吸收二氧化碳, 改善城市生态环境。目前对绿地生态系统的研究主要涉及净化空气、固碳释氧、减轻城市温室效应、改善小气候及隔音减噪等方面^[1-13]。笔者以哈尔滨市主城区 113 块绿地和 20 种常见植物为研究对象, 利用光合速率法进行光合测定, 估算其固碳量, 筛选出固碳能力强的植物和固碳效应高的绿地配置, 旨在为城市绿地高固碳植物群落优化配置及城市绿地建设提供科学依据与技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验样地 以哈尔滨市道里区、道外区、南岗区、香坊区、松北区、平房区为研究区域, 该研究区域涵盖哈尔滨市主城区的绿地植物群落。选取乔-灌-草、乔-灌、乔-草、灌-草、乔木、灌木、草本 7 种不同配置结构绿地, 共 113 块作为试验样地(图 1)。每块样地面积 25 m², 对每个样地的乔木层进行每木调查, 记录绿地中植物种、数量、冠幅、胸径、

高度; 灌木层记录每个植物种、高度、数量、冠幅; 草本层记录植物种和面积。

1.2 试验植物 在样地选取的基础上, 确定其中所包含的绿化植物为试验研究对象。其中共有乔木 11 种, 分别是水曲柳(*Fraxinus mandshurica* Rupr.)、银中杨(*Populus alba* ‘Berolinensis’)、榆树(*Ulmus pumila* Linn.)、糖槭(*Acer negundo* Linn.)、旱柳(*Salix matsudana* Koidz.)、白桦(*Betula platyphylla* Suk.)、山里红(*Crataegus pinnatifida* Bge.)、野梨(*Pyrus ussuriensis* Maxim.)、山桃稠李(*Prunus maackii* Rupr.)、山杏(*Prunus sibirica* Linn.)、垂榆(*Ulmus pumila* L. ‘Tenue’); 灌木 8 种, 分别为紫丁香(*Syringa oblata* Lindl.)、榆叶梅(*Prunus triloba* Lindl.)、紫穗槐(*Amorpha fruticosa* Linn.)、接骨木(*Sambucus williamsii* Hance)、红瑞木(*Cornus alba* Linn.)、黄刺玫(*Rose acicularis* Lindl.)、金银忍冬[*Lonice-ra maackii*(Rupr.) Macim]、金山绣线菊(*Spiraea × bumalda* cv. Goldenmound); 草本 1 种, 为早熟禾(*Poa annua* L.)。

1.3 研究方法

1.3.1 植物指标测定方法。

1.3.1.1 叶面积指数的测定。叶面积指数(leaf area index, LAI)是一块地上植株叶片的总面积与占地面积的比值^[14]。采用 LAI-2000 型树冠仪测定 20 种绿化植物的平均叶面积指数。

1.3.1.2 叶片光合作用的测定。采用 LI-6400 便携式光合仪作为试验仪器, 在 5—9 月每月的 15 日左右, 选择晴朗、无风的天气, 在自然光照条件下, 7:00—17:00, 每隔 2 h 测量 1 次。每次每树选取 4~6 个大小相似的、生长良好、生长在阳

基金项目 黑龙江省院所基本应用技术研究专项(ZNBZ2017ZR05)。
作者简介 李海燕(1974—), 女, 河北容城人, 副研究员, 硕士, 从事区域发展及生态环境保护研究。* 通讯作者, 研究员级高级工程师, 从事生态保护研究。
收稿日期 2017-10-25

面的叶片,重复测定 3~5 次,取最接近均值的测试数据作为测量叶片的光合速率。

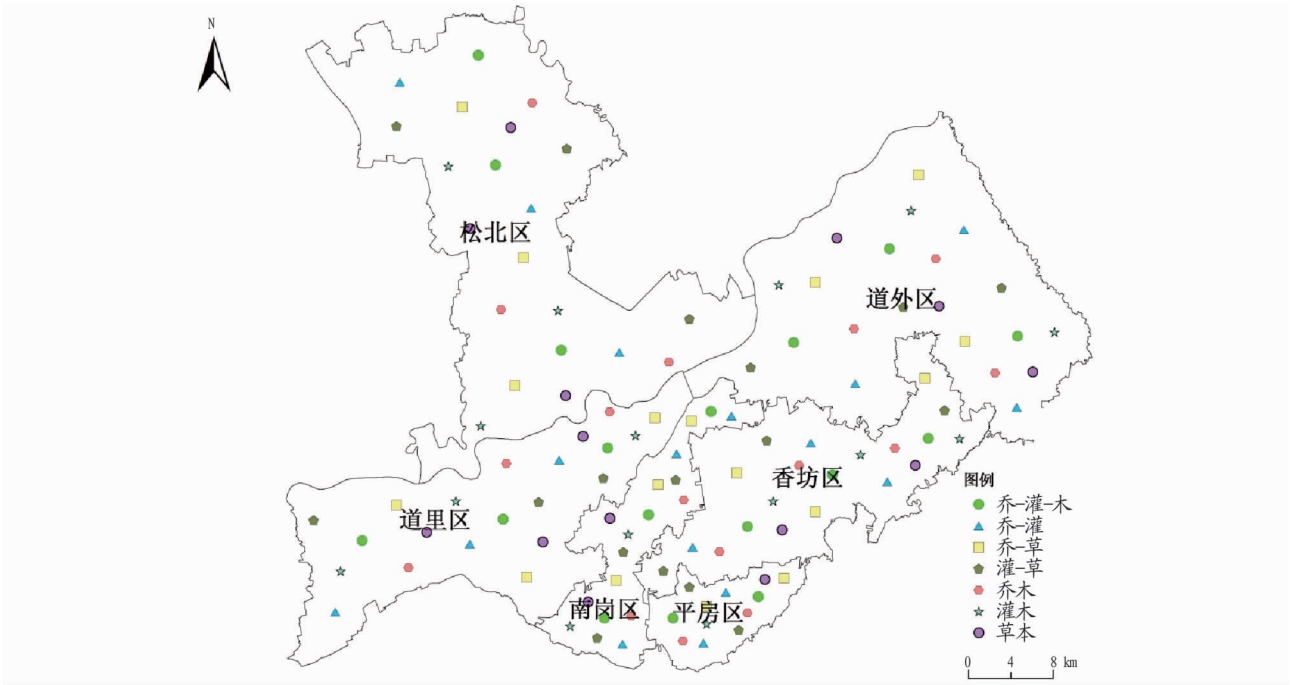


图 1 试验样地地理区位及绿地结构

Fig. 1 Location and green space structure of test sample

根据光合作用原理^[15],利用植物在测定当日的净同化量来估算植物的固碳量。各种植物在测定当日的净同化量计算公式:

$$P = \sum_{i=0}^j [(P_{i+1} + P_i) + 2(t_{i+1} - t_i) \times 3\,600 \div 1\,000]$$

式中, P 为单位叶面积的同化量 [$\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$]; P_i 为初始时刻瞬时净光合速率 [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]; P_{i+1} 为下一时刻净光合速率 [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]; t_i 为初始时间 (h); t_{i+1} 为下一时间 (h); j 为测试次数;3 600 指 3 600 s/h;1 000 指 1 000 μmol 。由此得到 5—9 月平均日净同化量 (P) (表 1)。

表 1 试验植物测定指标

Table 1 Measurement indexes of test plant species

植物分类 Classification of plant	植物种类 Species	叶面积指数 Leaf area index (LAI)	平均日净同化量 Average daily net assimilation (P) $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$
乔木 Arbor	水曲柳	3.02	119.73
	银中杨	3.91	340.41
	榆树	6.12	379.41
	糖槭	6.89	370.86
	早柳	5.24	136.48
	白桦	3.65	258.25
	山里红	5.31	113.23
	野梨	5.07	118.93
	山桃稠李	2.81	165.30
	山杏	2.81	212.50
	垂榆	4.97	330.98
灌木 Shrub	紫丁香	2.71	293.55
	榆叶梅	3.65	238.59
	紫穗槐	3.73	162.30
	接骨木	4.37	284.84
	红端木	3.44	182.98
	黄刺玫	3.14	348.16
	金银忍冬	4.54	119.73
	金山绣线菊	3.19	239.64
草本 Grass	早熟禾	1.63	89.11

1.3.2 植物固碳量计算方法。

1.3.2.1 单位叶面积日固碳量。根据光合作用的综合反应方程式,将每种植物日同化量转换成日固碳量: $W_{\text{CO}_2} = P \times 44/1\,000$,式中, W_{CO_2} 为叶片单位面积的日固碳量 [$\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$];44 为 CO_2 的摩尔质量。

1.3.2.2 单位冠幅面积日固碳量。植物单位冠幅面积的固碳量是叶面积指数和单位叶面积固碳量的综合反映,是评价单株植物固碳量的客观指标,公式为 $C_{\text{CO}_2} = \text{LAI} \times W_{\text{CO}_2}$,式中, C_{CO_2} 为单位冠幅面积的日固碳量 (g/m^2)。

1.3.2.3 单株植物固碳量研究方法。根据单位冠幅面积的固碳量和植物冠幅面积可得到单株植物固碳量,植物冠幅面积,可用皮尺分别测量植物东西冠幅和南北冠幅,并利用椭圆面积公式估算求得,公式为 $P_{\text{CO}_2} = S_p \times C_{\text{ca}}$, $S_p = (\pi \times a \times b)/4$,式中, P_{CO_2} 为单株植物的固碳量 ($\text{g}/\text{株}$); S_p 为植物冠幅面积 (m^2); a 为东西冠幅 (m), b 为南北冠幅 (m)。

1.3.2.4 绿地固碳量。根据绿地上种植的树种种类和数量,计算绿地植物的固碳总量,公式为 $G_s = \sum_{i=1}^j P_{\text{CO}_2,i} \times n_i + C_{\text{CO}_2} \times S_g$,式中, C_s 为某块绿地全部植物固碳量总和 (g); $P_{\text{CO}_2,i}$ 为第 i 种乔木或灌木单株植物固碳量 ($\text{g}/\text{株}$); C_{CO_2} 为草本植物的单位冠幅面积固碳量 (g/m^2); S_g 为草本植物的面积 (m^2)。

2 结果与分析

2.1 绿地植物固碳效应 结合表 1 中的结果,采用统计软件 SPSS 13.0,对 20 种植物单位叶面日固碳量 (W_{CO_2})、单位冠幅面积日固碳量 (C_{CO_2}) 进行聚类分析,结果见表 2。

表 2 植物固碳效应分析

Table 2 Analysis of the effect of carbon fixation in plants

植物分类 Classification	植物种类 Species	叶面积日固碳量 Diurnal carbon content of leaf area (W_{CO_2}) // $g/(m^2 \cdot d)$	排序 Rank	聚类 Cluster	冠幅面积日固碳量 Diurnal carbon content of crown area (C_{CO_2}) // $g/(m^2 \cdot d)$	排序 Rank	聚 类 Cluster
乔木 Arbor	水曲柳	5.27	16	3	15.92	19	3
	银中杨	14.98	4	1	58.57	4	1
	榆树	16.69	1	1	102.14	2	1
	糖槭	16.32	2	1	112.44	1	1
	旱柳	6.01	15	3	31.49	11	2
	白桦	11.36	8	2	41.46	7	2
	山里红	4.98	19	3	26.44	15	3
	野梨	5.23	18	3	26.52	14	3
	山桃稠李	7.27	13	3	20.43	18	3
	山杏	9.35	11	2	26.27	16	3
灌木 Shrub	垂榆	14.56	5	1	72.36	3	1
	紫丁香	12.92	6	2	35.01	9	2
	榆叶梅	10.50	10	2	38.33	8	2
	紫穗槐	7.14	14	3	26.63	13	3
	接骨木	12.53	7	2	54.76	5	1
	红瑞木	8.05	12	3	27.69	12	3
	黄刺玫	15.32	3	1	48.10	6	2
	金银忍冬	5.27	16	3	23.93	17	3
	金山绣线菊	10.54	9	2	33.62	10	2
草本 Grass	早熟禾	3.37	20	3	5.49	20	3

2.1.1 植物单位叶面积固碳量比较。由表 2 可知,20 种供试植物单位叶面积日固碳量有差异。其中,榆树固碳量最高,为 16.69 g/(m²·d);早熟禾固碳量最低,仅 3.37 g/(m²·d)。由聚类分析结果可知,单位叶面积日固碳量在 14.56 ~ 16.69 g/(m²·d)为一类植物,9.35 ~ 12.98 g/(m²·d)为二类植物,3.37 ~ 8.05 g/(m²·d)为三类植物。乔木糖槭、榆树、银中杨、垂榆,灌木接骨木单位叶面积日固碳量较高,均属一

类植物。从植物分类来看(图 2),乔木单位叶面积固碳量水平最高,而草本最低。对于各类型中植物个体,单位叶面积日固碳量差异较大,一些灌木植物的单位叶面积日固碳大于部分乔木植物,如黄刺玫为 15.32 g/(m²·d),而山里红为 4.98 g/(m²·d),因此不能直接根据植物类型评判单位叶面积日固碳量的大小,而应由具体植物而定。

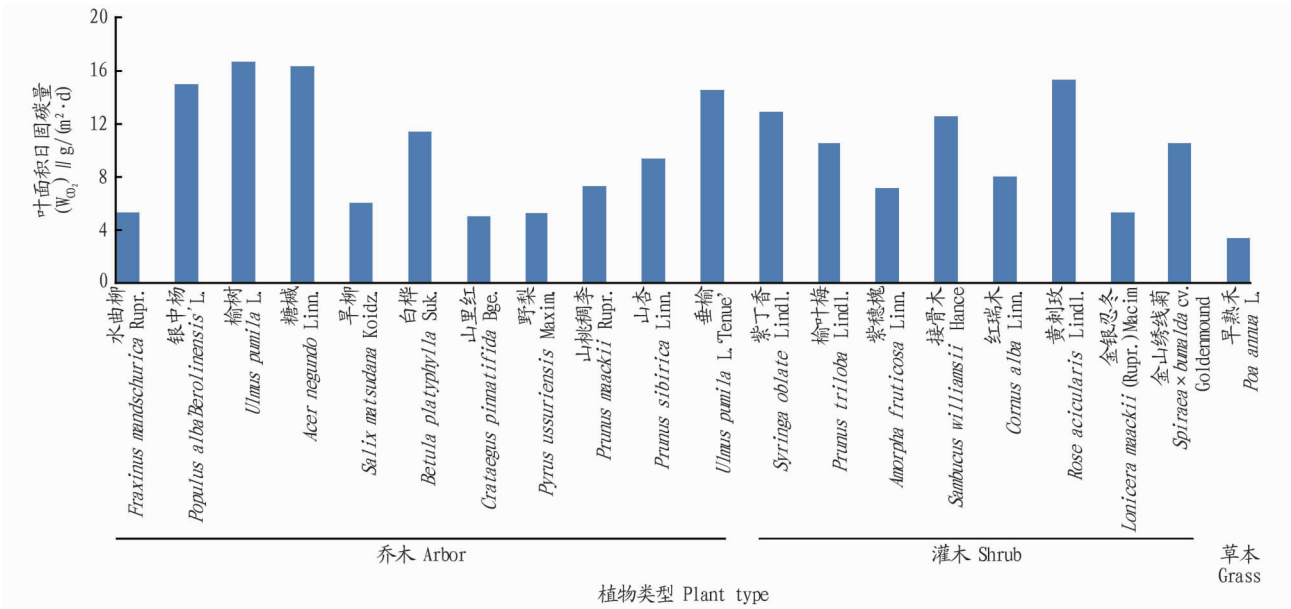


图 2 植物单位叶面积日固碳量比较分析

Fig.2 Comparative analysis of daily carbon sequestration per unit leaf area of different plant species

2.1.2 植物单位冠幅固碳量比较。由表 2 可知,20 种供试植物单位冠幅面积日固碳量有差异。其中,糖槭的单位冠幅

面积日固碳量最高,为 112.44 g/(m²·d);草本植物早熟禾最低,仅 5.49 g/(m²·d)。由聚类分析结果可知,单位冠幅

面积日固碳量在 54.76 ~ 112.44 g/(m²·d) 为一类植物,在 31.49 ~ 48.10 g/(m²·d) 为二类植物,5.49 ~ 26.69 g/(m²·d) 为三类植物。乔木中糖槭、榆树、银中杨、垂榆,灌木接骨木单位冠幅面积日固碳量最高,为一类树种。

从图 3 可以直观地看出,各类型植物的单位冠幅面积日固碳量从大到小依次为乔木、灌木、草本,可知单株乔木的固碳能力总体优于单株灌木和草本。

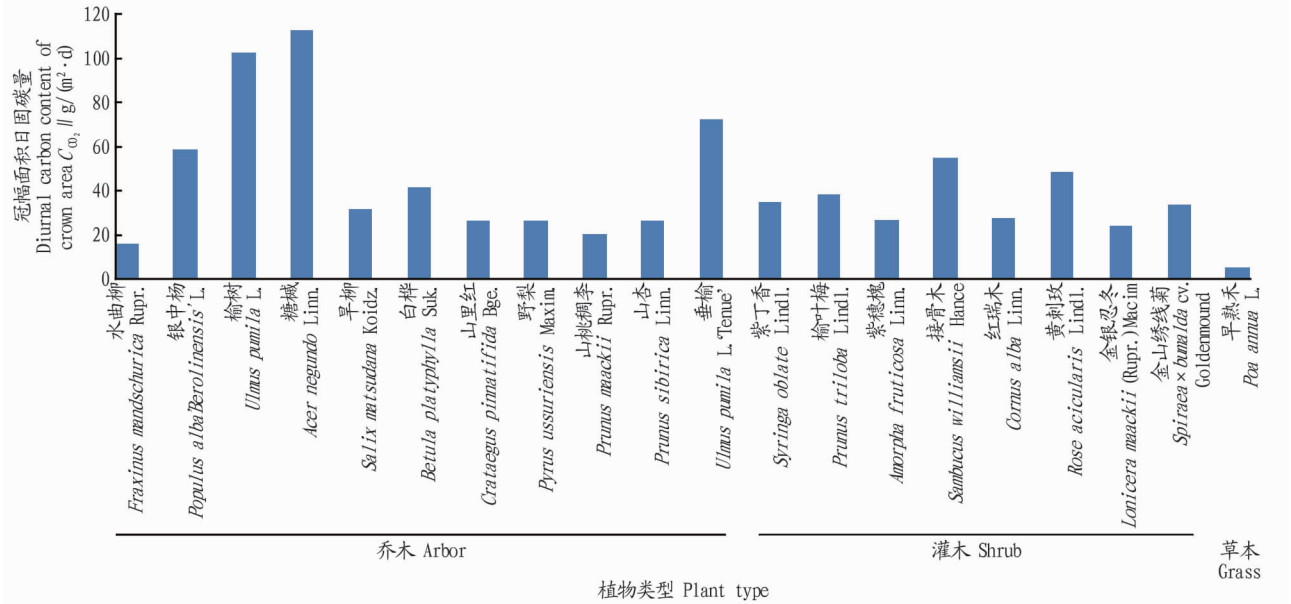


图 3 植物单位冠幅日面积固碳量比较分析

2.2 不同配置结构绿地固碳效应比较 对 113 块试验样地的每块样地中植物总固碳量进行计算,对乔-灌-草、乔-灌、乔-草、灌-草、乔木、灌木、草本 7 种不同配置结构绿地的日固碳量分别求平均值并进行比较,结果见图 4。

量最高的是榆树,单位冠幅面积日固碳量最高的是糖槭,采用聚类分析法将其分为 3 类,结果表明乔木中糖槭、榆树、银中杨、垂榆,灌木中接骨木、黄刺玫都是固碳能力较高的园林绿化植物,在园林绿化中可优先种植。

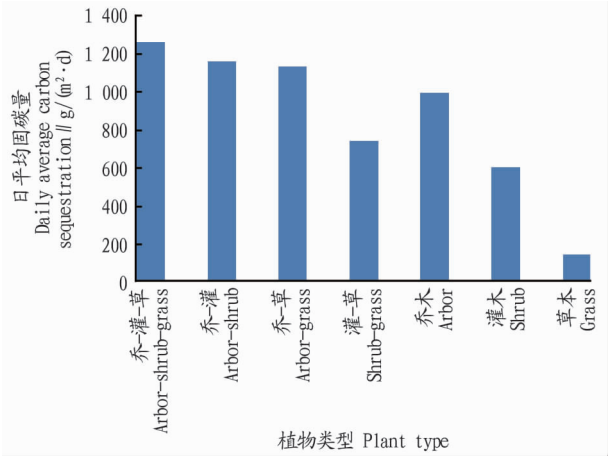


图 4 不同配置结构绿地日平均固碳量比较

Fig. 4 Comparative analysis of daily average carbon sequestration in green spaces with different configuration structure

从图 4 可以看出,各种绿地均具有一定的固碳效应,但不同的配置结构所产生的单位绿地面积固碳效应差异很大,从大到小依次为乔-灌-草、乔-灌、乔-草、乔木、灌木、草本,由此可知,乔-灌-草结构的固碳效应最强,草本最弱。

3 结论

(2) 不同配置结构绿地的单位面积固碳效应从高到低依次为乔-灌-草、乔-灌、乔-草、乔木、灌木、草本。糖槭、榆树、银中杨、垂榆、白桦、旱柳宜作为优良上层绿化树种,接骨木、黄刺玫、榆叶梅、金山绣线菊、紫丁香宜作为优良的中层绿化植物,下层是适合哈尔滨生长的早熟禾。典型的绿地配置结构可为糖槭+紫丁香+早熟禾、垂榆+金山绣线菊+早熟禾、榆树+接骨木+早熟禾、银中杨+黄刺玫+早熟禾等。

参考文献

[1] 陈自新,苏雪痕,刘少宗,等. 北京城市园林绿化生态效益研究(2)[J]. 中国园林,1998,14(5):57-60.
[2] 祝宁,李敏,柴一新. 哈尔滨市绿地系统生态功能分析[J]. 应用生态学报,2002,13(9):1117-1120.
[3] 管东生,陈玉娟,黄芳芳. 广州城市绿地系统碳的贮存、分布及其在碳氧平衡中的作用[J]. 中国环境科学 1998,18(5):437-441.
[4] 孙海燕,祝宁. 哈尔滨市绿化树种生态功能研究(1)[J]. 中国城市林业,2008,6(5):54-57.
[5] 杜鹏. 成都市五种常用园林树种三维绿量与生态效益研究[D]. 雅安:四川农业大学,2009.
[6] 郑中华. 上海绿化树种固碳耗水特性研究[D]. 南京:南京林业大学,2011.
[7] 朱燕青. 常见灌木固碳释氧及降温增湿效应研究:以长沙市为例[D]. 株洲:中南林业科技大学,2013.
[8] 郭杨,卓丽环. 哈尔滨居住区常用的 12 种园林植物固碳释氧能力研究[J]. 安徽农业科学,2014,42(17):5533-5536.
[9] 柴一新,祝宁,韩焕金. 城市绿化树种的滞尘效应:以哈尔滨市为例[J]. 应用生态学报,2002,13(9):1121-1126.

2.2 融合蛋白的表达与纯化 表达目的蛋白的重组工程菌株 RIL pGEX - 6P - 1 - EGX 的表达条件为 IPTG 0.4 mmol/L, 28 °C 诱导表达 3 h, 培养体积为 1 L。根据标准的 GST 纯化流程进行蛋白纯化。从洗脱组分看, 第 1 次洗脱的蛋白浓度最高, 依次减少, 获得的蛋白较纯, 仅在 40 kD 上方有一处杂带。通过同样的纯化方法, 获得了重组蛋白 EGX, EGX - Gluc1C, 并且浓缩洗脱组分, 最终蛋白浓度统一为 0.5 mg/mL (图 3)。

2.3 抗 Gluc1C 抗体的制备及效价检测 为了能够更深入地研究 Gluc1C 的功能, 制备了抗 Gluc1C 的血清。选择直接用目的蛋白的包涵体作为抗原, 经过 SDS - PAGE 后, 切割包含目的条带的胶条, 注射进入兔子体内。每隔 7 d 免疫 1 次, 共 3 次, 最终获得抗 Gluc1C 的免疫血清, 通过 Western blot 检测了血清的效价。取 Gluc1C 和嵌合体的诱导前、诱导后蛋白样进行检测发现, 获得的免疫血清能够很好地识别目的蛋白 Gluc1C, 并且也能识别嵌合体 (图 4)。

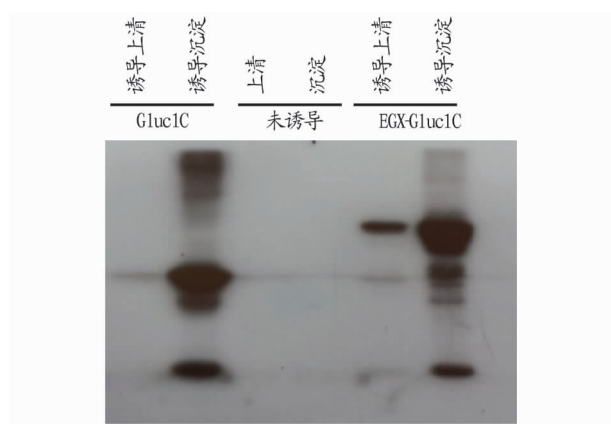


图 4 纤维素酶嵌合体 EGX - Gluc1C 的 Western blot 鉴定结果

Fig. 4 The Western blot test result for the chimera cellulase EGX-Gluc1C

3 讨论与结论

纤维素是地球上现存分布最广和含量最丰富的碳水化合物^[7]。对人类而言, 纤维素也是自然界中数量最大的可再生资源, 它的降解和再利用无疑是自然界碳素循环的中心环节。纤维素酶作用于纤维素的分子机制至今没有完全研究清楚, 纤维素酶产生菌的产酶能力不足, 以及所产生的纤维

素酶的组分不全是导致这一领域的研究与实际应用存在一定距离的主要原因^[8]。不同的微生物合成的纤维素酶不仅在组成上有显著的差异, 而且对纤维素的水解能力也大不相同, 原核生物和真核生物均能产纤维素酶^[9-10]。该研究构建了纤维素酶嵌合体 EGX - Gluc1C, 其中 EGX 是从福寿螺胃液中分离得到的一种多功能纤维素酶, 同时具有多种纤维素酶活性, Gluc1C 是从类芽孢杆菌中分离出的一种 β - 糖苷水解酶。中间以甘氨酸和丝氨酸构成的柔性肽重复序列 (G4S)3 连接, 保证了 2 个蛋白之间的空间结构不受影响。共获得了纯度较高的 3 种蛋白, 浓缩以后, 3 种蛋白的浓度统一确定为 0.5 mg/mL。同时还获得了效价很高的抗 Gluc1C 的兔血清, 为将来嵌合体的活性研究提供了基础。未来的研究还会涉及到嵌合体在毕赤酵母系统中表达是否会增强其活力; 嵌合体在 pH 耐受、热稳定性方面是否有提高。

参考文献

- [1] ADDEN R, NIEDNER W, MULLER R, et al. Comprehensive analysis of the substituent distribution in the glucosyl units and along the polymer chain of hydroxyethylmethyl celluloses and statistical evaluation [J]. Anal Chem, 2006, 78(4): 1146 - 1157.
- [2] PERCIVAL ZHANG Y H, HIMMEL M E, MIELENZ J R. Outlook for cellulase improvement: Screening and selection strategies [J]. Biotechnology advances, 2006, 24(5): 452 - 481.
- [3] ADSUL M G, SINGHVI M S, GAIKAIWARI S A, et al. Development of biocatalysts for production of commodity chemicals from lignocellulosic biomass [J]. Bioresource Technol, 2011, 102(6): 4304 - 4312.
- [4] BAYER E A, MORAG E, LAMED R. The cellulosome: A treasure-trove for biotechnology [J]. Trends Biotechnol, 1994, 12(9): 379 - 386.
- [5] GHOSE T K. Measurement of cellulase activities [J]. Pure Appl Chem, 1987, 59: 257 - 268.
- [6] ADLAKHA N, SAWANT S, ANIL A, et al. Specific fusion of β -1,4-endoglucanase and β -1,4-glucosidase enhances cellulolytic activity and helps in channeling of intermediates [J]. Applied and environmental microbiology, 2012, 78(20): 7447 - 7454.
- [7] AKCAPINAR G B, GUL O, SEZERMAN U. Effect of codon optimization on the expression of *Trichoderma reesei* endoglucanase 1 in *Pichia pastoris* [J]. Biotechnol Progr, 2011, 27(5): 1257 - 1263.
- [8] ALPER H, STEPANOPOULOS G. Engineering for biofuels: Exploiting innate microbial capacity or importing biosynthetic potential? [J]. Nat Rev Microbiol, 2009, 7(10): 715 - 723.
- [9] ANDERSON T D, ROBSON S A, JIANG X W, et al. Assembly of Minicellulosomes on the surface of *Bacillus subtilis* [J]. Applied and environmental microbiology, 2011, 77(14): 4849 - 4858.
- [10] ANGENENT L T, KARIM K, AL-DAHMAN M H, et al. Production of bioenergy and biochemicals from industrial and agricultural wastewater [J]. Trends Biotechnol, 2004, 22(9): 477 - 485.

(上接第 77 页)

- [10] 张新献, 古润泽, 陈自新, 等. 北京城市居住区绿地的滞尘效益 [J]. 北京林业大学学报, 1997, 19(4): 12 - 17.
- [11] 王效科, 冯宗炜. 中国森林生态系统中植物固定大气碳的潜力 [J]. 生态学杂志, 2000, 19(4): 72 - 74.
- [12] LI H, ZHAO W Z, GU R Z. Effects of three different green lands in plantation structure on the O₂-emitting, CO₂-fixing, heat-absorbing and temperature-decreasing in residential quarters [J]. Environ Sci, 1999, 20(6):

41 - 44.

- [13] WANG X R. Ecological park and urban environment protecting [J]. Chinese landscape architecture, 1998, 14(2): 14 - 16.
- [14] 徐阳. 上海市五种主要绿化树种三维绿量、叶面积指数等生态指标相关研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2010.
- [15] 韩焕金. 城市绿化植物的固碳释氧效应 [J]. 东北林业大学学报, 2005, 33(5): 68 - 70.