

刘海荣,冀媛媛,姚艳丽,等. 径流污染对 2 种地被植物固碳释氧降温增湿能力的影响[J]. 江苏农业科学,2019,47(17):257-260.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.17.063

# 径流污染对 2 种地被植物固碳释氧 降温增湿能力的影响

刘海荣,冀媛媛,姚艳丽,王 雪,李冰冰

(天津农学院,天津 300384)

**摘要:**采用生物滞留柱模拟生物滞留池的试验方法,研究径流污染对 2 种地被植物固碳释氧降温增湿能力的影响。结果表明,自来水浇灌条件下,马蔺的固碳释氧能力强于鸢尾,降温增湿能力弱于鸢尾,但是二者的差异并不显著;相对于自来水浇灌条件,地表径流水均显著提高了 2 种植物的固碳释氧能力,这种提高作用对马蔺的影响比鸢尾更大;相对于自来水浇灌条件,地表径流均降低了 2 种植物的降温增湿能力,这种降低作用对马蔺的影响显著,对鸢尾却不明显。

**关键词:**地被植物;降温增湿;固碳释氧;径流污染

**中图分类号:**S688.401;X522

**文献标志码:**A

**文章编号:**1002-1302(2019)17-0257-04

随着城市的发展和扩大,城市地面被大量钢筋混凝土建筑以及硬化地面所覆盖<sup>[1-2]</sup>,大气污染物沉降、汽车尾气、燃料泄露、轮胎磨损、动植物残体、生活垃圾等在硬质地面上汇集,经地表径流冲刷形成面源污染<sup>[3]</sup>,大量的地表径流通过城市管网排入城市河道,雨季到来,城市管网无法在短时间内排出大量地表径流,造成城市内涝,城市面源污染严重<sup>[4]</sup>。因此,城市管理者 and 研究者提出海绵城市建设理念<sup>[5-6]</sup>,希望城市能够像海绵一样在下雨时吸水,在不下雨时释放水,从而实现雨水的蓄、滞、渗、净、用、排的合理利用目标<sup>[7]</sup>。生物滞留池作为低影响开发(low impact development,简称 LID)体系中的一项重要技术<sup>[8-9]</sup>,在径流量削减、径流污染控制、地下水回补及景观方面具有显著的生态效应<sup>[10]</sup>,成为最具成本效益的雨水径流管理方法<sup>[11-12]</sup>。因此,近年来关于雨水花园(生物滞留池)的研究较多,但多数集中在基质的配置、基质对污染物的去除效果这 2 个方面,而对于植物的生态效益研究较少。笔者采用生物滞留柱模拟生物滞留池的试验方法,研究径流污染对鸢尾(*Iris tectorum* Maxim.) 和马蔺(*I. lacteal* Pall. var. *chinensis* (Fisch.) Koidz.) 固碳释氧降温增湿能力的影响,为植物选择提供科学依据。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验设计

1.1.1 生物滞留柱 选用直径为 25 cm、高为 75 cm 的塑料容器,下留 4 个直径为 0.5 cm 的排水孔,将该塑料容器置于直径为 40 cm、高为 15 cm 的集水盘中,集水盘距上沿 2 cm 处设溢水孔 1 个、直径 0.5 cm,上接有溢水管,溢水管的水由烧

杯进行收集。塑料容器从下至上依次为砾石层(粒径 <3 cm)5 cm、土工布层和沙层 5 cm、填料层(填料层为园土、蛭石、草炭体积比为 1:1:1 混合而成)55 cm、覆盖层(树皮)5 cm、蓄水层 5 cm。该试验装置于 2017 年 3 月在天津农学院植物实验室内制作完成。

1.1.2 植物准备 2017 年 4 月于天津市曹庄花卉市场选择生长健壮、株高为 10~15 cm 的马蔺和鸢尾同期土培苗(育苗钵高 10 cm,直径 10 cm)作为试验材料。取 5 个生物滞留柱,每个土柱以相等间距栽植 7 个小钵鸢尾,另取 5 个生物滞留柱,每个土柱以相等间距栽植 7 个小钵马蔺,以上土柱均浇灌地表径流水,另每种植物各设 5 个对照(浇灌自来水)。试验在具有均匀光照的条件下进行,防止雨淋。

1.1.3 浇灌水源 试验使用的地表径流水取自天津市西青区津静路上。分别在径流的起涨段、峰顶段、退水段各取样 3 次,试验前将径流水混合均匀后立即取样,并开始试验。自来水取自天津农学院植物实验室。

试验于 2017 年 6—8 月进行,以地表径流水对生物滞留柱进行浇灌,以自来水对对照组进行浇灌,在没有降水的落干期采用蒸馏水进行日常养护。

### 1.2 指标测定

于 2017 年 8 月中下旬的晴好、无风的天气情况下,采用 CI-340 便携式光合测定系统在每天 09:00—17:00 每 1 h 测量 1 次,共 3 次重复。随机选取马蔺和鸢尾生长健康的叶片,即从外面数第 2 张至第 3 张叶片进行活体测定(每个土柱取 3~5 张叶),待系统稳定后,每张叶片取 3 个瞬时光合速率值( $P_n$ ),同时对蒸腾速率( $E$ )、气孔导度( $G_s$ )、气温( $T_a$ )、胞间  $CO_2$  浓度( $C_i$ )等进行同步测定。以光合速率值和蒸腾速率值为基础,参照已有的计算方法对 2 种植物的固碳释氧量<sup>[13-14]</sup>和降温增湿量进行计算<sup>[15]</sup>。

### 1.3 数据分析

采用 SPSS 18.0 对数据进行分析。

收稿日期:2018-04-01

基金项目:国家社会科学基金(编号:17CG202);国家级大学生创新创业训练计划(编号:201710061067)。

作者简介:刘海荣(1982—),女,黑龙江齐齐哈尔人,硕士,讲师,研究方向为园林植物应用。E-mail:53447047@qq.com。

## 2 结果与分析

### 2.1 2 种地被植物净光合速率比较分析

地表径流水浇灌的马蔺净光合速率日变化呈单峰曲线(图 1),最高值出现在 11:00,达到  $12.06 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;之后净光合速率逐渐下降,15:00 降至  $1.85 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。自来水浇灌的马蔺净光合速率日变化呈双峰曲线,第 1 个高峰出现在 11:00,达到  $10.53 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;之后迅速下降,在 13:00—14:00 出现低谷;随后继续上升,15:00 出现第 2 个小高峰,值为  $5.85 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;之后缓慢下降,17:00 降至全天的最低值  $3.2 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。地表径流水浇灌的鸢尾净光合速率日变化呈双峰曲线,从 09:00 开始就维持较高的净光合速率水平;之后随着光照度的增加,至 10:00 达到全天的最大值  $9.19 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;之后缓慢下降,至 14:00 降到低谷,为  $4.86 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;随后的 15:00 出现全天的第 2 个小高峰,为  $5.02 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;随后逐渐下降,17:00 降至全

天的最低值。自来水浇灌的鸢尾净光合速率日变化呈 3 峰曲线,3 个峰值分别出现在 10:00、13:00、15:00,分别为  $5.39$ 、 $7.30$ 、 $6.93 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,其中最高峰出现在 13:00。不同水质浇灌,不同的植物净光合速率呈现完全不同的变化规律。总体来说,马蔺在 1 d 中的净光合速率较鸢尾变化剧烈,无论是地表径流水浇灌还是自来水浇灌,马蔺的净光合速率峰值均高于鸢尾。地表径流水浇灌的马蔺净光合速率范围为  $1.85 \sim 12.06 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,自来水浇灌的马蔺净光合速率范围为  $3.23 \sim 10.53 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;地表径流水浇灌鸢尾净光合速率范围为  $2.77 \sim 9.19 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,自来水浇灌的鸢尾净光合速率范围为  $2.45 \sim 7.30 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。不同水质浇灌的马蔺和鸢尾净光合速率基本表现为上午高于下午,与鸢尾相比,马蔺 1 d 的净光合速率变化较大,这说明马蔺能够对环境变化作出快速响应,以减少高温及高光照度等不利条件对其造成的伤害,植物的这种日净光合速率变化规律将直接影响它们的固碳释氧能力。

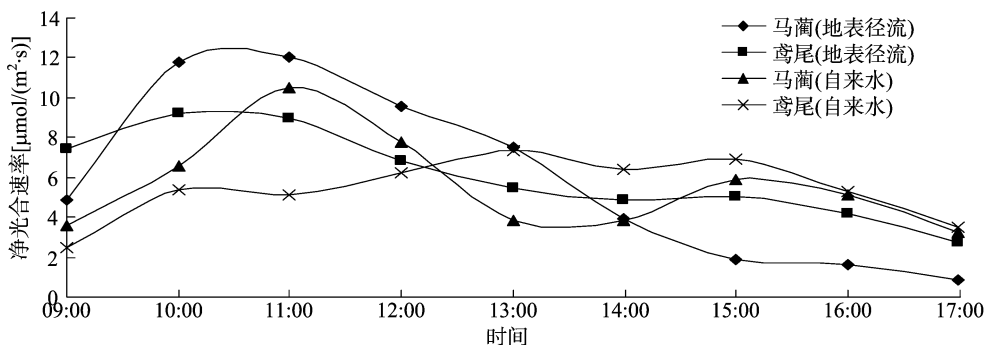


图1 2 种地被植物净光合速率日变化

### 2.2 2 种地被植物蒸腾速率比较分析

地表径流水浇灌的马蔺蒸腾速率日变化呈双峰曲线(图 2),峰值分别出现在 10:00、13:00,分别为  $1.57$ 、 $1.85 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;17:00 降至全天的最低值  $0.13 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。自来水浇灌的马蔺蒸腾速率日变化呈单峰曲线,最高峰出现在 11:00,为  $2.40 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;随后迅速下降,至 14:00—15:00 维持 1 个相对平稳的状态;随后继续下降,17:00 降至全天的最低值  $0.43 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。地表径流水浇灌的鸢尾蒸腾速率日变化呈双峰曲线,第 1 个峰值出现在 11:00,为  $1.96 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;随后略有下降,

13:00 出现第 2 个峰值,为  $1.54 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;17:00 降至全天的最低值  $0.37 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。自来水浇灌的鸢尾蒸腾速率日变化曲线为单峰曲线,峰值出现在 13:00,为  $2.57 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。总体来说,自来水浇灌的 2 种植物蒸腾速率日变化均为单峰曲线,且变化剧烈;而地表径流水浇灌的为双峰曲线,变化较为平缓。马蔺和鸢尾的最大峰值均表现为自来水 > 地表径流;最大的峰值除自来水浇灌的鸢尾外多数出现在 11:00 左右。说明地表径流中的污染物对植物的蒸腾作用产生了一定的抑制作用。

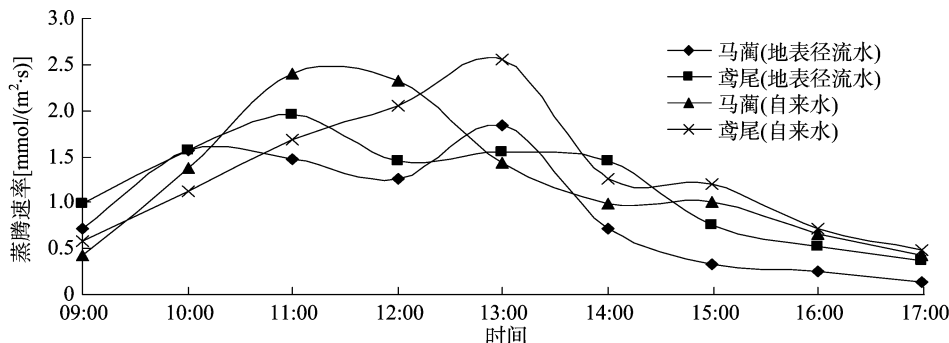


图2 2 种地被植物蒸腾速率日变化

### 2.3 2 种地被植物固碳、释氧量比较分析

以净光合速率变化曲线为基础,参照李想等的计算方法<sup>[16]</sup>可计算出不同水质浇灌条件下 2 种植物的日光合总量、

固碳量、释氧量(表 1)。地表径流水浇灌的马蔺日光合总量为  $184.39 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、固碳量为  $8.11 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、释氧量为  $5.72 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ,自来水浇灌的马蔺日光合总量为

168.79 mmol/(m<sup>2</sup>·d)、固碳量为 7.43 g/(m<sup>2</sup>·d)、释氧量为 5.23 g/(m<sup>2</sup>·d),不同水质浇灌的马蔺固碳量、释氧量表现为地表径流水>自来水,2 种水质浇灌的马蔺固碳量、释氧量在 0.05 水平上差异显著;地表径流水浇灌的鸢尾日光合总量为 178.68 mmol/(m<sup>2</sup>·d)、固碳量为 7.86 g/(m<sup>2</sup>·d)、释氧量为 5.54 g/(m<sup>2</sup>·d),自来水浇灌的鸢尾日光合总量为 164.39 mmol/(m<sup>2</sup>·d),固碳量为 7.23 g/(m<sup>2</sup>·d),释氧量为 5.10 g/(m<sup>2</sup>·d),不同水质浇灌的鸢尾固碳量、释氧量表现为地表径流水>自来水,2 种水质浇灌的鸢尾固碳量、释氧量在 0.05 水平上差异显著;不同水质浇灌条件下 2 种植物固碳量、释氧量均为马蔺>鸢尾,其中地表径流水浇灌的马蔺和鸢

尾固碳量、释氧量在 0.05 水平上差异显著,而自来水浇灌的马蔺和鸢尾固碳量、释氧量差异不显著。不同水质浇灌条件下 2 种植物固碳量、释氧量均表现为地表径流水>自来水,且差异显著,说明地表径流水中的污染物对 2 种植物生态效益具有影响,地表径流水中的总磷、氨态氮、总氮含量较自来水高得多,它们促进了 2 种植物的光合作用;不论是地表径流水浇灌还是自来水浇灌,固碳量、释氧量均表现为马蔺>鸢尾,其中地表径流水浇灌的差异显著,而自来水差异不显著,说明地表径流水中的污染物对 2 种植物光合速率产生了不同程度的影响,对马蔺的影响较大。

表 1 2 种地被植物固碳释氧量

植物名称	水质	日光合总量 [mmol/(m <sup>2</sup> ·d)]	固碳量 [g/(m <sup>2</sup> ·d)]	释氧量 [g/(m <sup>2</sup> ·d)]
马蔺	地表径流水	184.39a	8.11a	5.72a
	自来水	168.79c	7.43c	5.23c
鸢尾	地表径流水	178.68b	7.86b	5.54b
	自来水	164.39c	7.23c	5.10c

注:同列数据后不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。下表同。

2.4 2 种地被植物降温增湿量比较分析

以蒸腾速率日变化曲线为基础,可计算出不同水质浇灌条件下 2 种植物的日蒸腾总量、释水量、吸热量、降温幅度、相对湿度增加值(表 2)。地表径流水浇灌的马蔺日蒸腾总量为 56.63 mol/(m<sup>2</sup>·d)、释水量为 1 019.30 kg/(m<sup>2</sup>·d)、吸热量为 2 470.41 kJ/(m<sup>2</sup>·d)、降温幅度为 0.22 ℃、相对湿度增加值为 3.38%,自来水浇灌的马蔺日蒸腾总量为 76.36 mol/(m<sup>2</sup>·d),释水量为 1 374.41 kg/(m<sup>2</sup>·d),吸热量为 3 331.05 kJ/(m<sup>2</sup>·d),降温幅度为 0.29 ℃,相对湿度增加值为 4.55%,不同的水质浇灌的马蔺降温幅度、相对湿度增加值表现为自来水>地表径流水,2 种水质浇灌的马蔺降温幅度、相对湿度增加值在 0.05 水平上差异显著;地表径流水浇灌的鸢尾日蒸腾总量为 71.51 mol/(m<sup>2</sup>·d)、释水量为 1 287.14 kg/(m<sup>2</sup>·d)、吸热量为 3 119.55 kJ/(m<sup>2</sup>·d)、降温幅度为 0.28 ℃、相对湿度增加值为 4.26%,自来水浇灌的鸢尾日蒸腾总量为 80.12 mol/(m<sup>2</sup>·d)、释水量为 1 442.23 kg/(m<sup>2</sup>·d)、吸热量为 3 495.43 kJ/(m<sup>2</sup>·d)、降温幅度为 0.31 ℃、相对湿度增

加值为 4.78%,不同的水质浇灌的鸢尾降温幅度、相对湿度增加值表现为自来水>地表径流水,2 种水质浇灌的鸢尾降温增湿量差异不显著;不同水质浇灌条件下 2 种植物降温幅度、相对湿度增加值均为鸢尾>马蔺,其中地表径流水浇灌的马蔺和鸢尾降温幅度、相对湿度增加值在 0.05 水平上差异显著,而自来水浇灌的马蔺和鸢尾降温幅度、相对湿度增加值差异不显著。不同水质浇灌条件下 2 种植物降温幅度、相对湿度增加值均表现为自来水>地表径流,马蔺差异显著,而鸢尾差异不显著,说明地表径流水中的污染物对马蔺生态效益具有影响,地表径流水中的总磷、氨态氮、总氮含量较自来水高得多,他们降低了马蔺的蒸腾作用;不论是地表径流水浇灌还是自来水浇灌,降温幅度、相对湿度增加值均表现为鸢尾>马蔺,其中经地表径流水浇灌后 2 种植物降温幅度、相对湿度增加值差异显著,而自来水差异不显著,说明地表径流水中的污染物对 2 种植物蒸腾速率产生了不同程度的影响,对鸢尾的影响较大。

表 2 2 种地被植物降温增湿量

植物名称	水质	日蒸腾总量 [mol/(m <sup>2</sup> ·d)]	释水量 [kg/(m <sup>2</sup> ·d)]	吸热量 [kJ/(m <sup>2</sup> ·d)]	降温幅度 (℃)	相对湿度增加值 (百分点)
马蔺	地表径流水	56.63b	1 019.30b	2 470.41b	0.22b	3.38b
	自来水	76.36a	1 374.41a	3 331.05a	0.29a	4.55a
鸢尾	地表径流水	71.51a	1 287.14a	3 119.55a	0.28a	4.26a
	自来水	80.12a	1 442.23a	3 495.43a	0.31a	4.78a

2.5 2 种地被植物气孔导度、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度、叶绿素含量比较分析

由表 3 可以看出,不同水质浇灌的马蔺气孔导度表现为自来水 [47.63 mmol/(m<sup>2</sup>·s)]>地表径流水 [38.37 mmol/(m<sup>2</sup>·s)],二者差异显著,胞间二氧化碳浓度表现为自来水 (286.30 μmol/mol)>地表径流水 (171.82 μmol/mol),二者差异显著,叶绿素含量表现为自来

水 (1.69 mg/g)>地表径流水 (1.39 mg/g),二者差异显著;不同水质浇灌的鸢尾气孔导度表现为地表径流水 [53.36 mmol/(m<sup>2</sup>·s)]>自来水 [39.15 mmol/(m<sup>2</sup>·s)],二者差异显著,胞间 CO<sub>2</sub> 浓度表现为自来水 (258.17 μmol/mol)>地表径流水 (255.89 μmol/mol),二者差异不显著,叶绿素含量表现为自来水 (1.32 mg/g)>地表径流 (1.11 mg/g),二者差异不显著;2 种植物降温幅度、相对

湿度增加值均表现为自来水 > 地表径流水,相反固碳量、释氧量表现均表现为地表径流水 > 自来水,与自来水相比,地表径流水中的污染降低了马蔺的气孔导度,提高了鸢尾的气孔导度,但 2 种植物的胞间 CO<sub>2</sub> 浓度均处于较低水平,与自来水相比,2 种植物在地表径流水浇灌下蒸腾速率均较低,因而影响了降温幅度、相对湿度增加值。同时,污染物影响了叶绿素的合成或加速了叶绿素的分解,使叶绿素含量降低,这 2 个因素的影响都应该使植物的光合速率降低,但 2 种植物固碳量、释氧量均表现为地表径流水 > 自来水且差异达到显著水平。气孔导度和胞间 CO<sub>2</sub> 浓度是影响植物光合作用和蒸腾作用的重要因素,正常情况下气孔导度与蒸腾作用、光合作用、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度呈显著正相关关系,胞间 CO<sub>2</sub> 浓度与光合作用呈显著正相关关系,也就是说气孔导度越大,蒸腾速率越快,胞

间 CO<sub>2</sub> 浓度越大,净光合速率越大。而本研究结果与此不同,地表径流水浇灌的马蔺和鸢尾以比自来水低的气孔导度、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度、叶绿素含量获得了更大的净光合速率,更低的蒸腾速率,推测地表径流水中的某些污染物对马蔺和鸢尾光合作用有促进作用。

另外,地表径流水浇灌马蔺和鸢尾降温幅度、相对湿度增加值、气孔导度、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度均表现为鸢尾 > 马蔺,固碳释氧量表现为马蔺 > 鸢尾,且差异显著,叶绿素含量表现为马蔺 > 鸢尾,差异不显著;自来水浇灌的马蔺和鸢尾固碳量、释氧量、叶绿素含量、气孔导度、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度均表现为马蔺 > 鸢尾,降温幅度、相对湿度增加值表现为鸢尾 > 马蔺,其中固碳释氧量、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度、降温幅度、相对湿度增加值差异不显著,叶绿素含量、气孔导度差异显著。

表 3 2 种地被植物气孔导度、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度、叶绿素含量

植物名称	水质	气孔导度 [mmol/(m <sup>2</sup> ·s)]	胞间 CO <sub>2</sub> 浓度 (μmol/mol)	叶绿素含量 (mg/g)
马蔺	地表径流水	38.37b	171.82b	1.39b
	自来水	47.63a	286.30a	1.69a
鸢尾	地表径流水	53.36a	255.89a	1.11b
	自来水	39.15b	258.17a	1.32b

3 讨论与结论

通常情况下,植物叶片气孔导度、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度和叶绿素含量与净光合速率和蒸腾速率呈正相关关系<sup>[17-18]</sup>,而本试验数据表明,地表径流水浇灌的鸢尾气孔导度大于自来水浇灌条件下的气孔导度,地表径流水浇灌的马蔺气孔导度小于自来水浇灌条件下的气孔导度,除此之外,与自来水浇灌条件相比较,地表径流水浇灌的 2 种植物胞间 CO<sub>2</sub> 浓度和叶绿素含量都较低,虽然蒸腾速率都相应有所降低,但是净光合速率却都显著提高。地表径流水的特殊水质是如何促进了 2 种植物光合作用的、其影响机理有待于进一步研究。

本研究采用生物滞留柱模拟试验的方法,通过不同试验条件下净光合速率和蒸腾速率的测定,研究径流污染对 2 种地被植物固碳释氧降温增湿能力的影响,得出如下结论:(1)自来水浇灌条件下,马蔺的固碳释氧能力强于鸢尾,降温增湿能力弱于鸢尾,但是两者的差异并不显著;(2)相对于自来水浇灌条件,地表径流水均显著提高了 2 种植物的固碳释氧能力,这种提高作用对马蔺的影响比鸢尾更大;(3)相对于自来水浇灌条件,地表径流水均降低了 2 种植物的降温增湿能力,这种降低作用对马蔺的影响显著,对鸢尾却不明显。

参考文献:

[1]李婉亭,孙冬梅,冯平. 低影响开发措施(LID)对天津市暴雨径流影响模拟研究[J]. 自然灾害学报,2017,26(3):156-166.  
[2]赵兵兵,冯霖. 基于 LID 的沈阳市径流污染控制及对策[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2016,32(3):538-545.  
[3]陈莹,王昭,吴亚刚,等. 降雨特征及污染物赋存类型对路面径流污染排放的影响[J]. 环境科学,2017,38(7):2828-2835.  
[4]Xia J,Zhang Y Y,Xiong L H,et al. Opportunities and challenges of the sponge city construction related to urban water issues in China

[J]. Science China Earth Sciences,2017,60(4):652-658.  
[5]杜晓丽,韩强,于振亚,等. 海绵城市建设中生物滞留设施应用的若干问题分析[J]. 给水排水,2017,53(1):54-58.  
[6]孙中秀. 排水防涝及海绵城市建设中若干问题分析[J]. 建设科技,2018(1):19-20.  
[7]李兰,李锋. “海绵城市”建设的关键科学问题与思考[J]. 生态学报,2018(7):1-7.  
[8]于洪蕾,曾坚. 适应性视角下的海绵城市建设研究[J]. 干旱区资源与环境,2017,31(3):76-82.  
[9]胡东起,陈星,张其成,等. 低影响开发在海绵城市建设中的应用[J]. 水电能源科学,2017,35(4):18-21.  
[10]郭超,李家科,李怀恩,等. 雨水花园集中入渗对地下水水位和水质的影响[J]. 水力发电学报,2017,36(12):49-60.  
[11]仇付国,陈丽霞. 雨水生物滞留系统控制径流污染物研究进展[J]. 环境工程学报,2016,10(4):1593-1602.  
[12]Tang N Y,Tian L. Nitrogen removal by three types of bioretention columns under wetting and drying regimes[J]. Journal of Central South University,2016,23(2):324-332.  
[13]郝鑫杰,李素英,王继伟,等. 呼和浩特市 13 种绿化植物固碳释氧效率的比较研究[J]. 西北植物学报,2017,37(6):1196-1204.  
[14]Li G,Lin Q,Shen P P,et al. Variations in silicate concentration affecting photosynthetic carbon fixation by spring phytoplankton assemblages in surface water of the Strait of Malacca[J]. Acta Oceanologica Sinica,2013,32(4):77-81.  
[15]李少宁,赵云阁,丁杰,等. 7 种经济林树种降温增湿功能研究[J]. 环境科学与技术,2017,40(8):62-67.  
[16]李想,李海梅,马颖,等. 居住区绿化树种固碳释氧和降温增湿效应研究[J]. 北方园艺,2008(8):99-102.  
[17]肇思迪,娄运生,庞渤,等. UV-B 辐射增强下施硅对冬小麦光合特性和产量的影响[J]. 江苏农业学报,2017,33(5):1036-1043.  
[18]杜军利,梁岳,卢福岗,等. 玉米蚜刺吸对不同抗性玉米品种光合性能及生物量的影响[J]. 江苏农业学报,2018,34(4):735-740.