

蒸散视角下护坡植被滴灌技术评价

王辰元¹, 周明涛^{2,3*}, 胡旭东³, 赵同晖¹, 许文年^{2,3}

(1. 三峡大学土木与建筑学院, 宜昌 443002; 2. 水泥基生态修复技术湖北省工程研究中心(三峡大学), 宜昌 443002;
3. 三峡库区生态环境教育部工程研究中心, 宜昌 443002)

摘要: 为探明以复合型人造土壤为边坡种植土的植物蒸散对于高陡边坡生态恢复评价体系制定及水资源利用的重要意义, 以黑麦草、高羊茅、早熟禾和“黑麦草+高羊茅+早熟禾”混合草种为研究对象, 采用壤中滴灌技术, 通过改进后的 Penman-Monteith 公式研究草本植物实际蒸散量与作物系数, 以此评价壤中滴灌技术的生态效益。结果表明: 高羊茅的作物实际蒸散量和作物系数最大, 黑麦草其次, 早熟禾最小, 拟合的决定系数不小于 0.847; 养护初期各植物蒸散量相差较小, 均保持在 4.2 mm/d 左右; 养护结束后混合草种的蒸散量最大, 早熟禾最小, 分别约 6.2、5.7 mm/d; 养护前 20 d, 除早熟禾外, 黑麦草、高羊茅、混合草种实际蒸散量均差异不显著, 养护 20 d 后黑麦草、早熟禾、混合草种开始发生显著变化; 30 d 后各草种蒸散量均差异不显著; 4 类草本植物蒸散量差值随时间递增, 前期混合草种蒸散量低于黑麦草、高羊茅, 后期有明显的提升, 50 d 起混合草种作物系数大于单草种作物系数。以 30 d 为界, 30 d 作物系数相近; 生长初期的作物系数变幅最明显, 且月增幅随时间呈下降趋势, 但黑麦草和高羊茅的作物系数在任意时段均相近。边坡模型试验前期, 以坡面喷灌方式灌溉的植物生态值较高, 植物生长情况优于壤中滴灌方式, 但自养护中期开始, 壤中滴灌技术在生态效益上凸显优势, 比坡面喷灌技术高出 40.7%~1 444.0% 的生态值。

关键词: 灌溉; 草; 蒸散; 植被混凝土; Penman-Monteith 公式; 壤中滴灌; 作物系数; 植物生态值

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.10.011

中图分类号: S271

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2022)-10-0085-08

王辰元, 周明涛, 胡旭东, 等. 蒸散视角下护坡植被滴灌技术评价[J]. 农业工程学报, 2022, 38(10): 85-92. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.10.011 <http://www.tcsae.org>

Wang Chenyuan, Zhou Mingtao, Hu Xudong, et al. Assessment of buried drip irrigation in soil of slope-protection vegetation from evapotranspiration perspective[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(10): 85-92. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.10.011 <http://www.tcsae.org>

0 引言

为实现碳中和发展目标, 碳汇系统的构建亟需生态环境从中发力。植被混凝土生态护坡技术^[1-2]应运而生, 该技术将天然种植土、有机物料、水泥、添加剂、护坡草灌木种按既定比例混配在一起, 加水喷播于 45°~85° 坡度的工程扰动坡面, 因其具有水土保持、生态重建、环境美化等优良特性而受广泛应用。目前, 对植被混凝土非饱和和渗透理论虽已开展了较多研究, 但在实际边坡工程中不能单凭基材的水分迁移进行灌溉布局, 应考虑外界因素的制约与干扰, 其中影响最大的因素就是植物蒸散^[3]。在植物的整个生长周期中, 需经历根系分化、叶片蒸散、光合固碳等理化过程, 而蒸散是水文循环的重要组成部分, 与大气之间的水热交换联系紧密^[4]。如今, 生态修复边坡的灌溉技术主要以滴灌、喷灌为主, 在此基础上的技术评价除了考虑水分利用率和灌溉均匀度^[5-6]外, 对植

物生长情况(叶片数、叶片长、蒸散)^[7-8]的监测同样重要。因此, 研究不同灌水技术下的护坡植物蒸散效应, 不仅对水分高效利用起指导意义, 更可为边坡生态恢复评价体系提供理论参考。

前人对植物蒸散量的研究主要分为传统测量和经验模型估算两种方法。传统测量以称取蒸散前后质量为主, 但其考虑的要素过于单一, 结果较粗糙。蒸渗仪的出现使刘艳萍等^[9]的研究中测量植物蒸散的精确度有所提高, 然而, 该仪器只适用于矮小草本植株。随着研究的不断深入, 经验模型估算法与物理因子(温度、辐射、风速、水汽压、土壤热通量等)结合, 根据参考植物蒸散量(ET_0)来反映植物蒸散量, 主要有 Blaney-Criddle (B-C)、Priestley-Taylor (P-T)、Hargreaves-Samani (H-S)、Penman-Monteith (P-M) 等^[10-11]经验模型。由于各模型参数率定受地域影响较大, 冯浩等^[12-13]采用校正后的 B-C 模型分别预测出季风气候条件下的 ET_0 , 提高了该模型的计算精度; Gong 等^[14]把调整后的作物系数运用在 P-T 模型中, 作为估算日光温室植物 ET_0 的优选方法; Mehdizadeh 等^[15]采用修正后的 H-S 模型系数准确估算 ET_0 , 扩大了该模型在干旱半干旱地区的适用范围; 而中国多属温带气候, 水热同期, 适宜植物生长, 曹金峰等^[16-17]便证实了在中国各时期、各地域采用 P-M 模型计算 ET_0

收稿日期: 2022-01-11 修订日期: 2022-03-01

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC05049-02); 中国华电集团公司科研基金项目(12JJD201800018)

作者简介: 王辰元, 研究方向为边坡生态防护、非饱和土渗透特性。

Email: wcy@ctgu.edu.cn

*通信作者: 周明涛, 博士, 教授, 研究方向为边坡生态防护、岸库消落带生态治理。Email: zmt@ctgu.edu.cn

的普适性；但 P-M 模型对多源数据的依赖度较高，Valiantzas 等^[18-19]对部分区域的 P-M 模型参数进行了简化和修正，发现结果更接近于实测值。因此，P-M 模型作为估算 ET_0 的标准沿用至今。

在边坡生态修复工程的养护阶段，壤中滴灌技术因具有减少基材表层水分无效蒸发的特点而大规模应用，Evelt 等^[20]便对比了壤中滴灌与地表喷灌下玉米 (*Zea mays*) 和高粱 (*Sorghum bicolor* L. Moench) 的作物水分生产力；Patil 等^[21]利用大型蒸渗仪分别测定了秋葵 (*Abelmoschus esculentus* L. Moench) 在覆膜与不覆膜条件下的蒸散量；陈志君等^[22-23]结合算法模型准确模拟玉米和棉花 (*Gossypium hirsutum*) 的作物系数；为达到精准灌溉决策目标，Dingre 等^[24-25]构建了以滴灌为主的自动化控制系统，完善了番茄 (*Solanum lycopersicum*) 和甘蔗 (*Saccharum officinarum*) 在滴灌条件下的蒸散理论。

值得注意的是，现今的研究对象多为植物^[26-27]、水体^[28]、平缓地形的天然土^[29]，对于高陡坡面植物蒸散研究甚少。因此，本文基于水量平衡原理，通过蒸散试验得到典型护坡草本植物黑麦草 (*Lolium perenne* L., LP)、高羊茅 (*Festuca arundinacea*, FA)、早熟禾 (*Poa annua* L., PA) 和“黑麦草+高羊茅+早熟禾”混合草种 (Mixed grass, MG) 的实际蒸散量，再结合 P-M 模型计算参考作物蒸散量和作物系数，最后从植物生态值的角度评价壤中滴灌技术和坡面喷灌技术的生态效益，以期为高陡边坡生态恢复评价体系制定及水资源利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域及供试材料

试验于湖北省宜昌市三峡大学地质灾害试验楼 (30°44'01"N, 111°18'33"E) 进行，试验地海拔 74 m，属亚热带季风气候，夏季湿热冬季温润，年均气温 19.4 °C，年均降水量 1 204.2 mm，年均蒸发量 102.4 mm，相对湿度 76.7%，日照时数 (峰值) 1 646.9 h，平均风速 3.0 m/s，地面气压 100.0 kPa。

植被混凝土包括种植土、水泥、有机物料、绿化添加剂、水。种植土选自宜昌某土场，取回后风干、粉碎、过 2 mm 细筛，根据《土工试验方法标准》GB/T 50123—2019 测定其理化特征如下：最大干密度 1.4 g/cm³，液限 31.6%，塑限 17.1%。颗粒组成 (质量分数) 如下：粗砂 (2~0.5 mm) 44.23%、中砂 (5~>0.25 mm) 21.75%、细砂 (0.25~>0.075 mm) 17.38%、细粒 (≤0.075 mm) 16.64%，属于粉土质砂。

水泥选用宜昌华新水泥厂生产的 P.O 42.5 普通硅酸盐水泥；有机物料选用宜昌本地松树锯末，烘箱烘干后过 2 mm 筛；绿化添加剂为发明专利产品，含亲水矿物、棕榈纤维、腐殖质等。依照行业标准^[30]将以上物料均匀拌和，配制成平均体积含水率为 20.0% 的植被混凝土基层与面层。

1.2 试验设计及过程

1.2.1 蒸散试验

选用四个边长 100 mm 和一个边长 300 mm 的无盖

内、外箱，内箱底部镂空，外箱内壁布设加热丝，温控装置保持箱内 20 °C 恒温。为模拟实际边坡立地条件，设置内箱坡度 70°，坡向为北偏东 105°。内箱侧面中心处设有小孔，软水管穿过小孔一端连接滴头，另一端连接 2 L/h 流量的压力补偿式滴头，将滴头埋设于内箱中部。将植被混凝土以 2 cm 厚度分层、压实填入内箱，容重控制在 1.5 g/cm³，保证基、面层厚度分别为 8、2 cm。考虑试验时季节、气候因素，选取颗粒纯净、饱满的等质量黑麦草 (*Lolium perenne* L.)、高羊茅 (*Festuca arundinacea*)、早熟禾 (*Poa annua* L.)、“黑麦草+高羊茅+早熟禾”混合草种 (Mixed grass, MG) 各 20 g，依次播种于 4 个内箱。距外箱顶部 50 cm 处安置额定功率 36 W 的冷光源植物生长灯和额定功率 275 W 的热光源灯 (竖向尺寸为 174 mm)，透明薄膜覆盖顶部用于维持湿度，薄膜透光率 80.0%，具体装置见图 1。将风扇风速控制在 3 m/s，冷光源植物生长灯与热光源灯全程开启以模拟白天，因此折算成用于植物生长的等效功率 211.17 W/m²。各处理各三组重复，于 2021 年 8 月 25 日开始，持续 50 d。依据 Penman 假定的条件^[31]，待植物高度满足 8 cm 后，每日先将各内箱迅速移出外箱并称质量记为 M_{D1} ，再缓慢注水至箱底渗水时称质量为 M_{D2} ，最后放回箱内。由于一天内的蒸散量远大于植物质量增量，认为作物蒸散量 $ET_c=100 \times (M_{D1}-M_{D2})$ 。此外需测定相对湿度，视未揭薄膜时为最大相对湿度 RH_{max} ，称质量后为最小相对湿度 RH_{min} 。

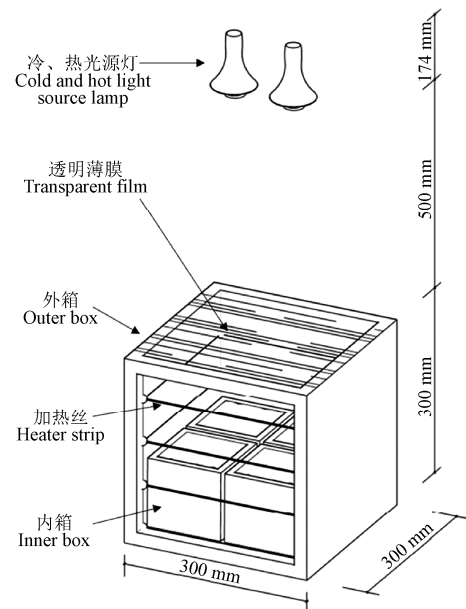


图 1 蒸散试验装置示意

Fig.1 Schematic diagram of evapotranspiration test device

1.2.2 边坡模型试验

边坡模型试验设计思路 (图 2)：先将边坡二等分，再细分为 4 个分区。二等分的原因：考虑到实际工况，位置高的喷头出流水会飞溅至下部 (喷灌条件下存在)，加之灌溉水会受重力影响向下渗流 (滴灌、喷灌条件下均存在)，水分浸润程度不均匀，因此，将各边坡等分为二。又再细分的原因：因为在预试验发现，受模

型坡度的影响, 灌水器下方的最远湿润距离为上方的 2 倍有余, 不同方向上边坡水分接收量不同, 植物生长情况不同, 所以, 将两部分均细分为 2 个分区 (1、2 分区和 3、4 分区), 2、3 号分区间设置隔水网以区别不同方向下植物的生长情况。

制作 2 个边长 200 cm 的正方形钢板, 四边垂直固定 10 cm 高的挡板; 模型自上而下等分成 4 个矩形分区, 2、3 号分区间设有隔水网; 为排除降雨影响, 模型顶部装有长 2 m、宽 1 m 的透明雨棚; 在距钢板 5 cm 高度处铺设 0.2 cm 丝径的活络金属网, 模拟实际边坡加固; 模型坡度、坡向要求同上。两边坡模型上各覆等质量植被混凝土和 100 g 混合草种, 覆土厚度 10 cm, 如图 2。其间, 2 号边坡模型灌水装置包括 DC40H-1265 型潜水泵 (内、外径为 9、11 mm, 出流量 360 L/h)、主管 (内、外径为 9、12 mm)、支管 (内、外径为 4、7 mm)、10 mm 流量调节阀、压力补偿式滴头 (等距 20 cm 安装于各支管); 1 号边坡模型中除灌水器为框架轮转式喷头外, 其余同上。支管埋/布设位置以同列滴头的纵向湿润锋线^[32]不交汇为原则, 在 1、3 号分区中部水平埋设于深度 2 cm 的基材中。待装置布设完毕 24 h 后开始灌水养护, 养护期 50 d。根据植物平均蒸散量与灌溉水利用系数设计灌水制度, 1 号坡每天灌水量为 25 L, 每天喷灌时间为 30 s, 喷灌间隔时间为 3.5 h; 2 号坡每天灌水量为 25 L, 每天滴灌时间为 45 s, 滴灌间隔时间为 4 h。试验于 2021 年 10 月 10 日开始, 待植物出芽率达到 85% 以上且植物高度在 8~15 cm 时, 在各分区采用 5 cm 等距的棋盘式取样法选取 20 株先锋植物, 做三组重复, 记录植物总长度和叶片数。



注: (1-1) 为 1 号喷灌边坡 1 号分区, (2-1) 为 2 号壤中滴灌边坡 1 号分区, 同理类推。其中, 各边坡的 1、3 号分区设有灌溉支管。
Note: (1-1) refers to No. 1 partition of No. 1 sprinkler-irrigation slope, (2-1) refers to No. 1 partition of No. 2 buried-drip-irrigation-in-soil slope, and so on. Among them, the No. 1 and No. 3 partitions of each slope are equipped with irrigation branch pipes.

图 2 边坡模型部分试验装置及分区情况

Fig.2 Partial test devices and partitioning of slope model

1.3 指标计算方法

1.3.1 参考作物蒸散量的计算

视护坡草本植物叶片宽阔, 生长旺盛葱郁, 可完全覆盖坡面且灌水充足, 经实地勘测后取草本植物平均高度 12 cm, 由 5—10 月为护坡植物生长旺盛月推算反射率 0.23; 假设热量、水汽传输边界层阻力相差较小, 由固定叶片阻力代换冠层边界层阻力得 70 s/m。参考作物蒸散量 ET_0 是影响蒸散效应最为主要的因素, 其受温度、湿度、风速等影响^[33], 若将其应用至边坡生态修复工程, 需对 ET_0 计算公式进行改进。常见的高陡岩/土质边坡坡高大于 30 m、坡度大于 45°, 为使 P-M 公式计算的坡面作物

参考蒸散量区别于一般平地, 需添加边坡系数以调整一天内的太阳净辐射量, 而边坡系数指在一定坡向、坡度条件下坡面植物可接收的太阳有效照射量, 具体公式^[34]如下:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta \cdot (R_n \cdot S - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T + 273} \cdot u \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0.34u)} \quad (1)$$

$$S = \left(\cos \frac{2\theta}{3} \right)^{1 - \sin \frac{\beta}{2}} \quad (2)$$

式中 ET_0 为参考作物蒸散量, mm/d; Δ 为饱和水汽压—温度关系曲线斜率, kPa/°C; R_n 为净辐射量, MJ/(m²·d); G 为土壤热通量, MJ/(m²·d); e_s 为饱和水汽压, kPa; e_a 为实际水汽压, kPa; γ 为湿度计常数, kPa/°C; u 为距坡面 2 m 处风速, m/s; S 为边坡系数, β 为坡向, (°); θ 为坡度, (°)。

G 、 e_s 、 e_a 、 γ 等相关数据可在“中国气象数据网” (<http://data.cma.cn/>) 获取。本试验将外箱控制温度 $T=20$ °C, 根据文献 [34-36] 计算得一天内的净辐射量 $R_n=18.245$ MJ/(m²·d), $\Delta=0.162$ kPa/°C, $G=1.825$ MJ/(m²·d); 当海拔高度 $Z=74$ m, 湿度计常数 $\gamma=0.066$ kPa/°C; 饱和水汽压由温度计算, 实际水汽压 e_a 由相对湿度计算, 最后得作物参考蒸散量 $ET_0=4.646$ mm/d。

1.3.2 作物系数的计算

作物系数 K_c 是称质量测得的实际作物蒸散量 ET_c 与参考作物蒸散量 ET_0 的比值^[34]。

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_0} \quad (3)$$

1.3.3 植物生态值的计算

在生态效益评价中, 往往将植物形态、长度因子数值化表示植物生长状态, 作物系数亦是生态评价的关键要素之一, 综合三者可建立较完善的生态评价体系, 计算公式^[37]如下:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^N (P_i + L_i)}{N} K_c \quad (4)$$

$$P_i + L_i = (n_i - 1) + \frac{l_i - l_{\min}}{l_{\max} - l_{\min}} \quad (5)$$

式中 L_i 为第 i 个植物长度值; N 为分区统计植物数; n_i 为植物叶片数量; l_i 为植物总长度, mm; l_{\max} 、 l_{\min} 为叶片数量相同的标记植物的最大、最小总长度, mm。

1.4 数据处理与分析

由于气象监测站距测区较远而导致数据精确度低, 需采用 Kriging 插值法获取测区气象数据。采用 Microsoft Excel 处理、拟合数据。使用 SPSS 单因素 ANOVA 法和 Duncan 法分析数据 ($\alpha=0.05$)。使用 Origin 进行图表绘制。图表中数据为平均值±标准差。

2 结果与分析

2.1 植物蒸散效应

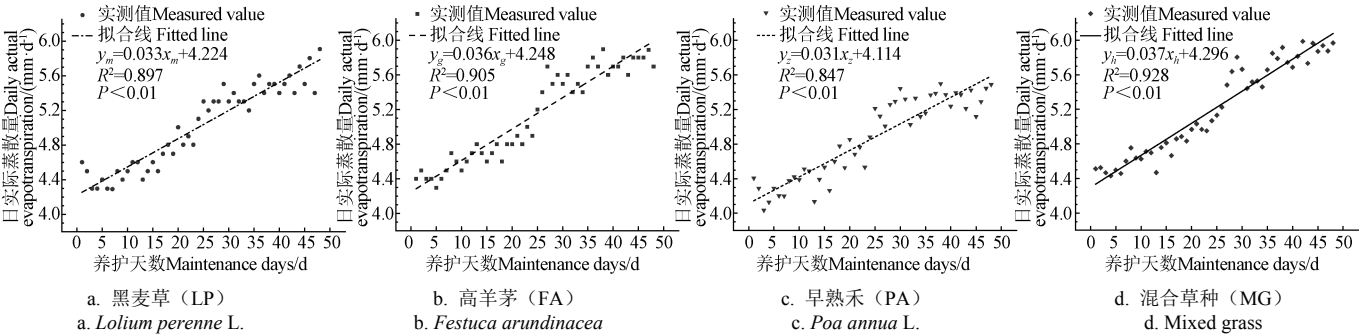
2.1.1 实测作物蒸散量

蒸散试验中, 由于植被混凝土配制时所设定的初始

含水率高达 20%，试验开始的前 2 天基材表层水分蒸发量远大于植物蒸散量，在称质量时变幅较大，因此剔除前两天数据。试验自第 3 天开始蒸散量趋于可控状态，分别记录黑麦草、高羊茅、早熟禾、混合草种日蒸散量与养护天数的关系，并做线性回归分析，如图 3。

由图 3 可知，混合草种日蒸散量变化较稳定，拟合程度最高，早熟禾拟合程度最低 ($R^2=0.847$)。除去基材表层蒸发的前 2 天，试验初期各植物蒸散量相近，均在 4.2 mm/d 左右，50 d 时 MG 蒸散量最大，达到 6.2 mm/d，PA 蒸散量最小，约为 5.7 mm/d，养护末期 LP、FA、PA、MG 的蒸散增长量分别是初期的 39.1%、42.4%、37.7%、

43.1%。试验发现，4 类草种分别在 4、7、5、3 d 开始萌芽，出芽率均在 90%以上。萌芽前草种发生吸胀作用，部分水分贮存于种内，水分散失减少，萌芽后植物因呼吸、代谢作用增强而导致蒸散量变大，因此在养护初期 (0~5 d) 蒸散量先下降后缓慢上升；前期 (6~20 d) 蒸散量较能体现线性关系，中期 (21~40 d) 导致蒸散量普遍大于拟合值，后期 (41~50 d) 恢复正常水平，总体呈上升趋势。除混合草种，其余三草种的拟合蒸散量在任意时段由高至低均为高羊茅、黑麦草、早熟禾，且三者差值随时间递增；而混合草种 MG 在养护前期蒸散量较低，后期有明显提升。



注：y_m、y_g、y_z、y_h 分别为黑麦草、高羊茅、早熟禾、混合草种的拟合蒸散量。
Note: y_m, y_g, y_z and y_h are fitted evapotranspiration of *Lolium perenne* L., *Festuca arundinacea*, *Poa annua* L. and mixed grass, respectively.

图 3 4 类草种的日实际蒸散量与养护天数的线性回归

Fig.3 Linear regression for daily actual evapotranspiration and maintenance days of four types of grass species

依据联合国粮食及农业组织 (FAO) 作物系数的生长程度划分标准^[34]，以 10 d 为一组，将养护时段分为 5 个周期，对比各草种的变化情况，如表 1 所示。

由表 1 可知，除早熟禾外，其余 3 类草种在 20 d 前实际蒸散量均差异不显著；除高羊茅外，20 d 后开

始发生显著变化；30 d 后的各草种实际蒸散量均差异不显著。整个养护时段内，早熟禾的 10 d 均实际蒸散量最低，混合草种最高；此外，混合草种的 10 d 均实际蒸散量增幅最大，高羊茅和黑麦草增幅其次，早熟禾最小。

表 1 黑麦草、高羊茅、早熟禾、混合草种的 10 d 平均作物实际蒸散量

Table 1 The mean 10-days actual crop evapotranspiration of *Lolium perenne* L., *Festuca arundinacea*, *Poa annua* L. and mixed grass

养护周期 Maintenance period /d	作物实际蒸散量 Actual crop evapotranspiration/(mm·10 d ⁻¹)			
	黑麦草 <i>Lolium perenne</i> L.	高羊茅 <i>Festuca arundinacea</i>	早熟禾 <i>Poa annua</i> L.	混合草种 Mixed grass
1~10	4.52±0.53c	4.56±0.52c	4.37±0.56d	4.62±0.48c
11~20	4.56±0.36c	4.66±0.31bc	4.45±0.42c	4.71±0.35c
21~30	5.04±0.48b	5.10±0.57ab	4.88±0.51b	5.13±0.50b
31~40	5.40±0.35a	5.61±0.41a	5.29±0.39a	5.66±0.41a
41~50	5.58±0.42a	5.74±0.31a	5.34±0.34a	5.86±0.33a

注：同列不同小写字母表示不同时间之间差异显著 ($P<0.05$)。
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference among different times ($P<0.05$).

2.1.2 作物系数

由表 1 可知，4 类草种的蒸散量在 30 d 左右出现显著差异且蒸散量均值相差较大，因此以 30 d 为界，采用改进的模型计算参考作物蒸散量，分段研究各草种的作物系数。再根据实际蒸散量拟合出 4 类植物的作物系数。根据拟合结果，以 30 d (1 月) 为节点，计算各月节点值，统计实测时段 (0~50 d) 与预测时段 (51~90 d) 共 3 个月的各类草种作物系数，如表 2 所示。由表 2 知，4 类作物系数随时间呈上升趋势。萌发初期作物系数相差甚微，均在 0.9 左右；养护 30 d 后，作物系数增长至 1.1，首个月增幅超过 20%，随后增幅呈下降趋势，90 d 时在

20% 以下。为便于工程实践，以月为单位，求得 4 类草种的月均作物系数如表 3。

由表 3 可知，4 类草种首月作物系数在 1.0 左右，次月作物系数接近 1.2，3 个月后作物系数接近 1.5。与“FAO-56”的作物系数^[34]对比发现，护坡草本植物的作物系数普遍略高。

2.2 生态效益评价

由于试验选用的混合草种与实际护坡草本植物具有较高相似度，本部分沿用其作物系数，结合式 (4) 和式 (5) 计算得到植物生态值，以此评价两种灌溉技术的养护情况，如图 4 所示。

表 2 拟合后各草种在 90 d 内的作物系数及月增幅
Table 2 The crop coefficient and monthly increase of each species within 90 d

养护天数 Maintenance day/d	黑麦草 <i>Lolium perenne</i> L.		高羊茅 <i>Festuca arundinacea</i>		早熟禾 <i>Poa annua</i> L.		混合草种 Mixed grass	
	作物系数 Crop coefficient	月增幅 Monthly increase /%	作物系数 Crop coefficient	月增幅 Monthly increase /%	作物系数 Crop coefficient	月增幅 Monthly increase /%	作物系数 Crop coefficient	月增幅 Monthly increase/%
0	0.895	-	0.899	-	0.872	-	0.909	-
30	1.105	23.5	1.133	26.1	1.070	22.7	1.148	26.3
50	1.246	-	1.289	-	1.202	-	1.308	-
60	1.316	19.0	1.367	20.7	1.268	18.5	1.388	20.9
90	1.526	16.0	1.602	17.1	1.466	15.6	1.627	17.3

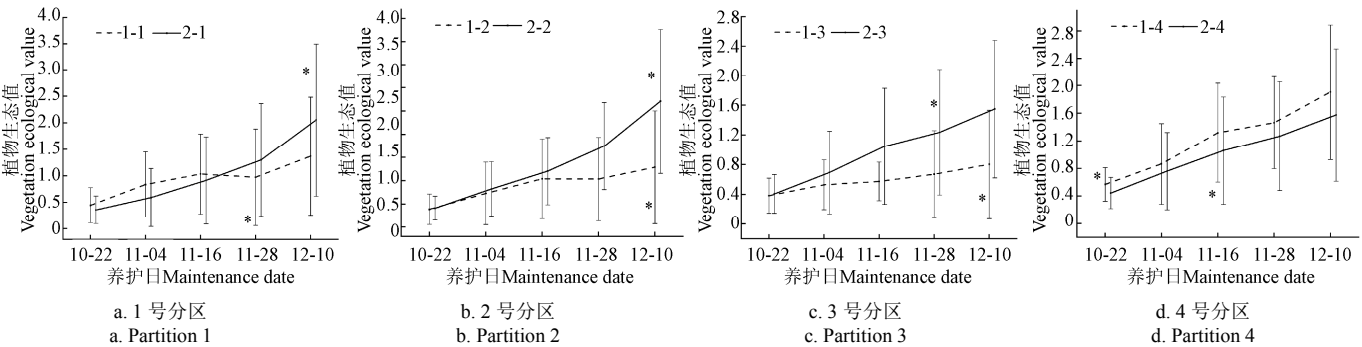
表 3 护坡草本植物月均作物系数
Table 3 Monthly mean crop coefficient of herbaceous plants for slope protection

草种 Species	月数 Months		
	1	2	3
黑麦草 <i>Lolium perenne</i> L.	1.00	1.21	1.42
高羊茅 <i>Festuca arundinacea</i>	1.02	1.25	1.48
早熟禾 <i>Poa annua</i> L.	0.97	1.17	1.37
混合草种 Mixed grass	1.03	1.27	1.51

4 个分区的植物生态值均随养护时间递增,说明两技术均对植物生态值有正向影响,说明灌溉有利于植物生长。从 1、2 号分区可看出自 30 d 起,壤中滴灌技术下的生态值与喷灌生态值的差距出现明显拐点;而 3 号分区自养护开始该技术在生态值上便体现明显优势;4 号分区喷灌下的生态值大于壤中滴灌可能是因为喷灌水短时间内不易被基材和植物吸收,使得部分喷灌水射流或顺坡

流至底部区域,进而导致该技术下的植物长势较好。在实际工程中,坡面喷灌技术亦存在灌水不均的问题,而导致植物覆盖率低。

另外,养护初期喷灌下的生态值普遍占优,但其生态值增长平缓,随着养护时间的推移,壤中滴灌下的生态值往往表现出更大增速,养护末期 2-2 号分区的壤中滴灌生态值最大可达 4.26,比同时段下喷灌的最大生态值(平均值+标准差)高出 70.4%。综合对比 4 个分区两技术的植物生态值,发现壤中滴灌技术下的植物生态值整体比坡面喷灌技术高 40.7%~1 444.0%。参照“云南省向家坝水电站进场路岩质边坡生态修复工程”、“长江三峡工程永久船闸下游引航道边坡生态修复工程”中护坡植物养护实例,鉴于生长周期(萌芽、生长、开花、结果)远大于 30 d,因此可认为壤中滴灌技术下的生态值总体高于喷灌技术,壤中滴灌技术下的植物生长情况更佳。



注: “*” 指同一分区两技术的植物生态值出现最大增幅。
Note: “*” referred to the maximum increase in plant ecological value of two techniques in the same partition.

图 4 壤中滴灌技术和坡面喷灌技术下植物生态值变化

Fig.4 Changes of plant ecological value under buried drip irrigation in soil and slope sprinkler irrigation

3 讨 论

相较于坡面喷灌,壤中滴灌的湿润体体积大,易在表面形成干土层,从而减少土水蒸发。试验前 2 天蒸散量存在较大降幅,基材表层的水分因接触空气发生大规模蒸发,滴灌出流水无法及时补足表层,含水率在短时间内减小,土壤蒸发强度衰减,水分传输阻力增大,因此作物蒸散量有明显下降。随着天数增加,植物根系发育深扎基材,壤中滴灌水可直接被根系吸收,蒸散效果随之增强。此外,试验土为人造复合型土壤,前期注入的水分会与土中水泥和亲水性矿物发生水化反应,从而影响植物蒸散,后期趋于稳定。

试验发现,以植被混凝土为边坡生态修复基材的作

物系数普遍高于“FAO-56”的作物系数(冷季型草种 $K_c \approx 0.9^{[34]}$),且赵炳祥等^[38-39]研究了以壤土为种植土的草坪草蒸散量,得出的冷季型草种作物系数亦高于“FAO-56”,且高羊茅最大,与本研究结果相同。而由蒸散效应得出的边坡作物系数与洪明等^[40]研究的 5—9 月混合草坪(早熟禾、高羊茅、黑麦草)作物系数存在一定出入,分析认为一方面是平地植物一天内吸收的太阳有效辐射量与护坡植物有较大差别,进而影响了蒸散量变化;另一方面,夏季高温易使土表大量水分散失,而单用蒸渗仪法测定作物蒸散量往往误将土表水蒸发量一并算入作物蒸散量,从而导致实际测得的作物蒸散量和计算得出的作物系数均变大。同时,冷季型草种高温休眠、寒冷生长,本试验的养护时段处于秋冬交替期,在植物物候期的作

用下,更能反映真实结果。

坡面喷灌虽能在养护前期补足植物生长所需水分,但植被混凝土基材表面形成的较为致密的生物结皮在一定程度上会阻碍喷灌水的入渗,而壤中滴灌的出流水在基质吸力的推动下直接作用于植物根部,保证植物长势良好的同时,大大降低水分损耗。

本研究从作物蒸散的角度较为系统地探讨了壤中滴灌技术与坡面喷灌技术的优劣,但尚未从水分利用、经济效益、运行管理等方面分析。试验时段处于秋冬交际期,只选用适宜生长的冷季型护坡草种,后续可进行冷暖季、多年生草本和典型护坡灌木混种,多角度评价壤中滴灌技术下植被混凝土的优势。

4 结 论

1) 研究了植被混凝土 4 类护坡草种的日实际蒸散量和作物系数,结果表明:各草种的日实际蒸散量及其差值均随养护天数递增,混合草种在养护前期蒸散量略低于黑麦草和高羊茅,但高于早熟禾,中期高羊茅与混合草种的蒸散量相近,后期混合草种蒸散量最大,其次是高羊茅,早熟禾最小;作物系数亦逐日增加,整体上混合草种最高、其次为高羊茅、黑麦草、早熟禾,且整个养护时段均呈此关系。

2) 养护初期喷灌下的生态值普遍占优,但一个月后壤中滴灌下的生态值开始凸显优势直至养护结束。综合考虑作物蒸散、植物长势等因素后,认为壤中滴灌技术对植物的生长作用优于坡面喷灌技术,壤中滴灌技术下的植物生态值整体比坡面喷灌技术高 40.7%~1 444.0%。

参 考 文 献

- [1] Cheng H, Xu W N, Luo T, et al. Microbial functional diversity as affected by different engineered eco-restoration methods at Xiangjiaba hydropower station[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2020, 146(3): 04019125.
- [2] Zhao B Q, Liu D X, Xia Z Y, et al. Effect of cement content in vegetation concrete on soil physico-chemical properties, enzyme activities and microbial biomass[J]. *Nature Environment & Pollution Technology*, 2018, 17(4): 1065-1075.
- [3] Bai P, Liu X M, Zhang Y Q, et al. Assessing the impacts of vegetation greenness change on evapotranspiration and water yield in China[J]. *Water Resources Research*, 2020, 56(10): e2019WR027019.
- [4] Silva C O F, de Castro Teixeira A H, Manzione R L. Agriwater: An R package for spatial modelling of energy balance and actual evapotranspiration using satellite images and agrometeorological data[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2019, 120: 104497.
- [5] He S S, Zeng Y, Liang Z X, et al. Economic evaluation of water-saving irrigation practices for sustainable sugarcane production in Guangxi Province, China[J]. *Sugar Tech*, 2021, 23(6): 1325-1331.
- [6] Lozano D, Ruiz N, Baeza R, et al. Effect of pulse drip irrigation duration on water distribution uniformity[J]. *Water*, 2020, 12(8): 2276.
- [7] Zhu L H, Wang, Y J, Jiang L H, et al. Effects of residual hydrocarbons on the reed community after 10 years of oil

extraction and the effectiveness of different biological indicators for the long-term risk assessments[J]. *Ecological Indicators*, 2015, 48: 235-243.

- [8] 王振龙, 范月, 吕海深, 等. 基于气象-生理的夏玉米作物系数及蒸散估算[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(11): 141-148. Wang Zhenlong, Fan Yue, Lyu Haishen, et al. Estimation of summer maize crop coefficient and evapotranspiration based on meteorology-physiology[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2020, 36(11): 141-148. (in Chinese with English abstract)
- [9] 刘艳萍, 杜雅丽, 聂铭君, 等. 基于称重式蒸渗仪及多种传感器的作物表型及蒸散监测系统研制[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(1): 114-122. Liu Yanping, Du Yali, Nie Mingjun, et al. Design of crop phenotype and evapotranspiration monitoring system based on weighing lysimeter and multi-sensors[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2019, 35(1): 114-122. (in Chinese with English abstract)
- [10] Martel M, Glenn A, Wilson H, et al. Simulation of actual evapotranspiration from agricultural landscapes in the Canadian Prairies[J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2018, 15: 105-118.
- [11] Ghiat I, Mackey H R, Al-Ansari T. A review of evapotranspiration measurement models, techniques and methods for open and closed agricultural field applications[J]. *Water*, 2021, 13(18): 2523.
- [12] 冯浩, 刘匣, 褚晓升, 等. 基于 Blaney-Criddle 方法估算潜在蒸散量的评价与校准[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(6): 159-167. Feng Hao, Liu Xia, Chu Xiaosheng, et al. Evaluation and calibration of Blaney-Criddle method for estimating potential evapotranspiration[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(6): 159-167. (in Chinese with English abstract)
- [13] Xiong Y J, Luo Y F, Wang Y, et al. Forecasting daily reference evapotranspiration using the Blaney-Criddle model and temperature forecasts[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2016, 62(6): 790-805.
- [14] Gong X W, Wang S S, Xu C D, et al. Evaluation of several reference evapotranspiration models and determination of crop water requirement for tomato in a solar greenhouse[J]. *HortScience*, 2020, 55(2): 244-250.
- [15] Mehdizadeh S, Saadatnejadgharahassanlou H, Behmanesh J. Calibration of Hargreaves-Samani and Priestley-Taylor equations in estimating reference evapotranspiration in the Northwest of Iran[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2017, 63(7): 942-955.
- [16] 曹金峰, 李玉中, 刘晓英, 等. 四种参考作物蒸散量综合法的比较[J]. *中国农业气象*, 2015, 36(4): 428-436. Cao Jinfeng, Li Yuzhong, Liu Xiaoying, et al. Comparison of four combination methods for reference crop evapotranspiration[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2015, 36(4): 428-436. (in Chinese with English abstract)
- [17] Xiao M Z, Kong D D. Improvement in the estimation of daily net surface radiation in China[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2021, 147(3): 04021002.
- [18] Valiantzas J D. Temperature-and humidity-based simplified Penman's ET_0 formulae: Comparisons with

- temperature-based Hargreaves-Samani and other methodologies[J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 208: 326-334.
- [19] 王娟, 王建林, 刘家斌, 等. 基于 Penman-Monteith 模型的两个蒸散模型在夏玉米农田的参数修正及性能评价[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(6): 1917-1924.
Wang Juan, Wang Jianlin, Liu Jiabin, et al. Parameters modification and evaluation of two evapotranspiration models based on Penman-Monteith model for summer maize[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(6): 1917-1924. (in Chinese with English abstract)
- [20] Evett S R, Marek G W, Colaizzi P D, et al. Corn and sorghum ET, E, yield, and CWP as affected by irrigation application method: SDI versus mid-elevation spray irrigation[J]. *Transactions of the ASABE*, 2019, 62(5): 1377-1393.
- [21] Patil A, Tiwari K N. Evapotranspiration and crop coefficient of okra under subsurface drip with and without plastic mulch[J]. *Current Science*, 2018, 115(12): 2249-2258.
- [22] 陈志君, 朱振闯, 孙仕军, 等. Stacking 集成模型模拟膜下滴灌玉米逐日蒸散量和作物系数[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(5): 95-104.
Chen Zhijun, Zhu Zhenchuang, Sun Shijun, et al. Estimation of daily evapotranspiration and crop coefficient of maize under mulched drip irrigation by Stacking ensemble learning model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(5): 95-104. (in Chinese with English abstract)
- [23] Yuan X L, Bai J, Li L H, et al. Modeling the effects of drip irrigation under plastic mulch on vapor and energy fluxes in oasis agroecosystems, Xinjiang, China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 265: 435-442.
- [24] Dingre S K, Gorantiwar S D. Determination of the water requirement and crop coefficient values of sugarcane by field water balance method in semiarid region[J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 232: 106042.
- [25] 顾哲, 袁寿其, 齐志明, 等. 基于 ET 和水量平衡的日光温室实时精准灌溉决策及控制系统[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(23): 101-108.
Gu Zhe, Yuan Shouqi, Qi Zhiming, et al. Real-time precise irrigation scheduling and control system in solar greenhouse based on ET and water balance[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2018, 34(23): 101-108. (in Chinese with English abstract)
- [26] 胡晨, 葛继稳, 许向南, 等. 基于 FAO56 Penman-Monteith 公式估算神农架大九湖泥炭湿地蒸散及作物系数[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(5): 1699-1706.
Hu Chen, Ge Jiwen, Xu Xiangnan, et al. Estimation of evapotranspiration and crop coefficient in Dajiuhu peatland of Shennongjia based on FAO56 Penman-Monteith[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(5): 1699-1706. (in Chinese with English abstract)
- [27] 段利民, 童新, 吕扬, 等. 固沙植被黄柳、小叶锦鸡儿蒸腾耗水尺度提升研究[J]. *自然资源学报*, 2018, 33(1): 52-62.
Duan Limin, Tong Xin, Lv Yang, et al. Upscaling of the transpiration and water consumption of sand-fixing vegetation *Salix gordejewii* and *Caragana microphylla*[J]. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(1): 52-62. (in Chinese with English abstract)
- [28] Liu W L, Liu L N. Analysis of dry/wet variations in the Poyang Lake basin using standardized precipitation evapotranspiration index based on two potential evapotranspiration algorithms[J]. *Water*, 2019, 11(7): 1380.
- [29] 段浩, 赵红莉, 蒋云钟. 遥感 Penman-Monteith 模型中土壤含水量与土壤蒸发的关系[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2020, 18(3): 31-47.
Duan Hao, Zhao Hongli, Jiang Yunzhong. Assessment the relationship between soil evaporation and soil moisture using remote sensing Penman-Monteith model[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2020, 18(3): 31-47. (in Chinese with English abstract)
- [30] 水电水利规划设计总院. NB/T35082-2016 水电工程陡边坡植被混凝土生态修复技术规范[S/OL]. (2016-08-16)[2016-12-01] <http://www.nea.gov.cn/>.
- [31] Penman H L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass[J]. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1948, 193(1032):120-145.
- [32] 王辰元, 周明涛, 胡旭东, 等. 壤中滴灌条件下植被混凝土水分运移规律[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(2): 173-180.
Wang Chenyuan, Zhou Mingtao, Hu Xudong, et al. Moisture migration of vegetation concrete under buried drip irrigation in soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(2): 173-180. (in Chinese with English abstract)
- [33] 黄会平, 曹明明, 宋进喜, 等. 1957—2012 年中国参考作物蒸散量时空变化及其影响因子分析[J]. *自然资源学报*, 2015, 30(2): 315-326.
Huang Huiping, Cao Mingming, Song Jinxi, et al. Temporal and spatial changes of potential evapotranspiration and its influencing factors in China from 1957 to 2012[J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(2): 315-326. (in Chinese with English abstract)
- [34] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements: FAO Irrigation and Drainage Paper 56[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of United Nation, 1998.
- [35] ASCE-EWRI. The ASCE standardized reference evapotranspiration equation[R]. Task Committee on Standardization of Reference Evapotranspiration. New York, USA: Technical Committee Report, 2005.
- [36] 刘钰, 蔡林根. 参照腾发量的新定义及计算方法对比[J]. *水利学报*, 1997, 42(6): 28-34.
Liu Yu, Cai Lingen. Update definition and computation of reference evapotranspiration comparison with former method[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1997, 42(6): 28-34. (in Chinese with English abstract)
- [37] 曹建如. 旱作农业技术的经济、生态与社会效益评价研究—以河北省为例[D]. 北京: 中国农业科学院, 2007.
Cao Jianru. Economic, Ecological and Social Effect Evaluation of Dry Land Technology: A Case Study in Hubei Province[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [38] 赵炳祥, 胡林, 陈佐忠, 等. 常用六种草坪草蒸散量及作物系数的研究[J]. *北京林业大学学报*, 2003, 25(6): 39-44.
Zhao Bingxiang, Hu Lin, Chen Zuozhong, et al. Evapotranspiration rates and crop coefficients of turf grasses

- in North China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2003, 25(6): 39-44. (in Chinese with English abstract)
- [39] 袁小环, 滕文军, 张辉, 等. 实测草坪蒸散量评价 P-M 模型在北京地区适用性[J]. 农业工程学报, 2018, 34(7): 147-154.
- Yuan Xiaohuan, Teng Wenjun, Zhang Hui, et al. Suitability assessment of P-M model by measuring ET_0 of turfs in Beijing, China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(7): 147-154. (in Chinese with English abstract)
- [40] 洪明, 谷爱莲, 张磊, 等. 新疆乌鲁木齐市复合绿地耗水特性研究[J]. 草地学报, 2019, 27(1): 97-103.
- Hong Ming, Gu Ailian, Zhang Lei, et al. Study on water consumption characteristics of compound green space in Urumqi Xinjiang[J]. Acta Agrestia Sinica, 2019, 27(1): 97-103. (in Chinese with English abstract)

Assessment of buried drip irrigation in soil of slope-protection vegetation from evapotranspiration perspective

Wang Chenyuan¹, Zhou Mingtao^{2,3*}, Hu Xudong³, Zhao Tonghui¹, Xu Wennian^{2,3}

(1. College of Civil Engineering and Architecture, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Hubei Provincial Engineering Research Center of Slope Habitat Construction Technique Using Cement-based Materials (China Three Gorges University), Yichang 443002, China; 3. Engineering Research Center of Eco-environment in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, Yichang 443002, China)

Abstract: A vegetation concrete protection has been one of the most widely used technologies for the bare steep slopes in the ecology fields. Among them, the vegetation evapotranspiration can determine the regional distribution of available water resources in the soil-vegetation-atmosphere system. It is also a high demand to evaluate the utilization of water resources for the high-steep slope. In this study, a systematic evaluation was made of the ecological benefit of herbs planted in vegetation concrete under the buried drip irrigation in soil. An improved Penman-Monteith formula was also adopted to calculate the actual crop evapotranspiration (ET_c) and the crop coefficient for the herbs, including *Lolium perenne* L., *Festuca arundinacea*, *Poa annua* L. and the mixed-grass seeds of “*Lolium perenne* L.+*Festuca arundinacea*+*Poa annua* L.” Hence, the experimental materials were prepared, and the slope planting soil was selected as the composite artificial soil. Subsequently, the improved Penman-Monteith formula was established for the slope ecological restoration using the slope coefficient factor, according to the project requirement of ecological slope protection. Specifically, the test grass was sown in the surface layer of the proportioned vegetation concrete that was attached to the slope model, when installing the irrigation equipment. The irrigation system was also designed to ensure the same amount of irrigation per day using the average evapotranspiration of plants and irrigation water utilization coefficient. Moreover, the evapotranspiration test was conducted to balance the water resource for the daily vegetation evapotranspiration to measure. In addition, the equipment for buried drip irrigation in soil and slope sprinkler irrigation were installed on two slope models in fields. The results revealed that the actual evapotranspiration and crop coefficient of *Festuca arundinacea* were the largest, followed by *Lolium perenne* L. and the lowest of *Poa annua* L. All the determination coefficients R^2 were not less than 0.847 for the linear fitting of the actual crop evapotranspiration and crop coefficient. There was a small difference in evapotranspiration of each plant at the initial stage of the maintenance, particularly at around 4.2 mm/d. After finishing maintenance, the largest and lowest evapotranspiration were obtained for the mixed grass, and *Lolium perenne* L., which were about 6.2 and 5.7 mm/d, respectively. In the first 20 days of the maintenance stage, there was no significant difference in the actual evapotranspiration of *Lolium perenne* L., *Festuca arundinacea* and mixed grass, except *Poa annua* L. More importantly, the *Lolium perenne* L., *Poa annua* L. and mixed grass greatly varied after 20 days, but there was no significant difference in the evapotranspiration of each grass after 30 days. The differences in the evapotranspiration of four herbs increased with time. Particularly, the evapotranspiration of mixed grass was lower than those of *Lolium perenne* L. and *Festuca arundinacea* at the early stage, but rose significantly at the later stage. The crop coefficient of mixed grass was also greater than those of the rest of single grass over 50 days. Taking the 30th day (one month) as a threshold, there was only a little divergence of crop coefficient within 30 days. Moreover, there was the largest variation of crop coefficient at the initial stage of growth, indicating a downward trend for the monthly increase. However, the values of crop coefficient were similar for the *Lolium perenne* L. and *Festuca arundinacea* at any period. As such, the obtained crop coefficients were utilized to calculate the vegetation ecological value for the evaluation of the ecological benefits of the technology of buried drip irrigation in soil and slope sprinkler irrigation. The results showed that the vegetation ecological value increased with the maintenance time, indicating a positive impact of two technologies on the value. Additionally, the slope sprinkler irrigation presented a higher vegetation ecological value than the buried drip irrigation in soil for the vegetation growth in the early stage of the slope model test. Nevertheless, the buried drip irrigation in soil was superior to the ecological benefit during the middle stage. In a word, the vegetation ecological benefit of buried drip irrigation in soil was better than that of slope sprinkler irrigation, where the ecological value was 40.7%-1 444.0% higher than that of slope sprinkler irrigation.

Keywords: irrigation; grass; evapotranspiration; vegetation concrete; Penman-Monteith formula; buried drip irrigation in soil; crop coefficient; vegetation ecological value