

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.03.006

气象条件对生物滞留单元水文效应的影响

王瑶^{1,2}, 王卫光^{1,2}

(1. 河海大学水灾害防御全国重点实验室; 2. 河海大学水文水资源学院)

摘要: 基于8座海绵城市建设试点城市的气象资料,采用全分布式地表水-地下水耦合模型ParFlow-CLM对理想化生物滞留汇水区长期水文过程开展数值模拟,系统探究典型生物滞留单元径流、渗漏、蒸散发过程对气象条件的响应特征。结果表明:生物滞留单元的地表径流量主要受模拟年降雨场次的平均降雨强度影响;平均降雨强度也是影响年深层渗漏量与年降水量比值的主要气象因子;当生物滞留单元底部原土的渗漏能力为零(或生物滞留单元经过防渗处理)时,年地下径流系数与年内各场次的平均降雨强度呈一定的负相关关系,而与年降水量、年潜在蒸散量与年降水量的比值(E_p/P)基本不相关;随着原土渗漏能力的增强,年地下径流系数与平均降雨强度的相关性逐渐转向正相关,与年降水量、 E_p/P 也逐渐呈现一定的相关性;生物滞留单元总蒸散量与汇水区年降水量的比值与 E_p/P 呈现较强的线性相关关系。

关键词: 海绵城市;低影响开发;生物滞留设施;水文模型;ParFlow-CLM

Impacts of meteorological conditions on hydrological effects of a bioretention cell

Wang Yao^{1,2}, Wang Weiguang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University;
2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University)

Abstract: Based on the meteorological data of eight pilot cities for sponge city construction, the fully distributed surface water-groundwater coupled model ParFlow-CLM was applied to simulate long-term hydrological processes of an idealized bioretention catchment, and response characteristics of runoff, seepage, and evapotranspiration processes of a typical bioretention cell to meteorological conditions were systematically explored. The results indicate that the surface runoff volume of the bioretention cell is primarily influenced by the average rainfall intensity of rainfall events in the simulation year; the average rainfall intensity is also the main meteorological factor affecting the ratio of annual deep seepage to annual precipitation; when the seepage capacity of native soil at the bottom of the bioretention cell is zero (or the bioretention cell is treated with anti-seepage measures), the annual subsurface runoff coefficient shows a certain negative correlation with the average rainfall intensity of events within the year but is largely uncorrelated with annual precipitation and the ratio of annual potential evapotranspiration to annual precipitation (E_p/P); as the seepage capacity of native soil increases, the correlation between the annual subsurface runoff coefficient and average rainfall intensity gradually shifts to a positive correlation, and a certain correlation with annual precipitation and E_p/P gradually emerges; the ratio of total evapotranspiration of the bioretention cell to annual precipitation of the catchment shows a strong linear correlation with E_p/P of the catchment.

Key words: sponge city; low impact development; bioretention facility; hydrological model; ParFlow-CLM

生物滞留设施是海绵城市建设与现代雨洪管控体系的关键基础性设施,可有效实现径流削减、洪峰滞延与面源污染管控,在城市雨洪综合治理中发挥着至关重要的作用^[1-2]。生物滞留设施通过汇集雨水径流,利用植物、土壤和微生物的协同作用,实现径流的蓄滞与净化,能有效缓解城市内涝^[3-5]、改善水环境质量^[6-7]、促进雨水资源化利用^[8-9]。生物滞留设施的径流控制效果与降雨条件密切相关^[10-12];高强度、短历时降雨往往会导致生物滞留设施迅速饱和,降低其径流控制效果,而低强度、长历时降雨则有利于生物滞留设施充分发挥其渗透和滞蓄功能。此外,在长期过程中,气象条件还会影响蒸散发、地下水补给、降雨产流等过程,不同气象条件下生物滞留设施的水文响应可能有显著差异^[13-15]。我国气候区域跨度大,气候类型多样,从热带季风气候到温带大陆性气候,不同区域的气象条件差异显著。这种气候多样性决定了我国海绵城市建设不能采用统一标准或固定模式,而需要根据当地气象特征因地制宜地进行规划和设计。开展不同气象条件

下生物滞留设施水文响应规律研究,对海绵城市的科学规划与建设具有重要意义。

本文以理想化生物滞留汇水区为研究对象,采用全分布式地表水-地下水耦合模型 ParFlow-CLM 开展水文模拟试验。该模型可实现地表与地下水文过程的精细化模拟,近年来已广泛应用于城市水文演变、低影响开发水文效应评估等领域,具备良好的适用性。本文选取 8 座海绵城市建设试点城市的实测气象资料,构建多组差异化气象情景,通过模拟典型生物滞留单元的径流、渗漏、蒸散发等关键水文过程,系统剖析不同气象条件下的水文变化特征,进而揭示生物滞留设施对气象条件变化的响应规律。

1 研究方法

1.1 ParFlow-CLM

ParFlow-CLM 是一个基于物理控制方程的全分布式水文模型。ParFlow-CLM 通过耦合求解 Richards 方程(式(1))以及运动波/扩散波方程(式(2))模拟地表、地下水流,同时耦合 CLM(community land model)计算地表与大气的 水分、热量交换,模拟土壤、植被的蒸散发过程。

$$SS_s \frac{\partial p}{\partial t} - \varphi \frac{\partial S}{\partial t} = \nabla \cdot \boldsymbol{q} + q_s + \frac{q_e}{m'}$$

(1)

$$\frac{\partial \psi_s}{\partial t} = \nabla \cdot \boldsymbol{v} \psi_s + q_r + q_e$$

(2)

其中

$$S = \begin{cases} S_{\text{res}} + \frac{S_{\text{sat}} - S_{\text{res}}}{(1 + |\alpha p|^n)^m} & p < 0 \\ S_{\text{sat}} & p \geq 0 \end{cases} \quad \boldsymbol{q} = -K \nabla(p - z)$$

$$K = K_{\text{sat}} S_e^l [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \quad S_e = \frac{S - S_{\text{res}}}{S_{\text{sat}} - S_{\text{res}}}$$

$$\boldsymbol{v} = (v_x, v_y) = \left(-\frac{\sqrt{S_{f,x}}}{n} \psi_s^{\frac{2}{3}}, -\frac{\sqrt{S_{f,y}}}{n} \psi_s^{\frac{2}{3}} \right)$$

式中: S 为土壤水分饱和度; p 为土壤水压力水头; S_s 为土壤贮水率; t 为时间; φ 为土壤孔隙度; q_s 为源汇项; q_e 为地下与地表的水分交换通量; m' 为区分地表、地下区域的边界层厚度; K 为土壤导水率; z 为高程; S_{res} 为土壤残余饱和度; S_{sat} 为土壤完全饱和时的饱和度; α 、 m 、 n 、 l 均为经验参数; K_{sat} 为土壤饱和导水率; ψ_s 为地表水深; $\boldsymbol{v}$ 为水平平面上地表水的平均流速矢量; q_r 为降雨强度; $S_{f,x}$ 、 $S_{f,y}$ 分别为水平平面上横向和纵向的摩阻坡度。当采用运动波形式时, $S_{f,x}$ 、 $S_{f,y}$ 分别等于横向、纵向的地表坡度;当采用扩散波形式时, $S_{f,x}$ 、 $S_{f,y}$ 分别等于横向、纵向的地表坡度与水深坡度之和。ParFlow-CLM 假设水头压力及水流通量在地表、地下的交界处连续,将式(2)转换为 Richards 方程的边界条件,并在此基础上对耦合系统进行求解,实现地表、地下水流的耦合模拟^[16]。

1.2 气象情景及模型设置

本文采用 ParFlow-CLM 模拟一个理想化生物滞留汇水区的水文过程。汇水区包括生物滞留单元和不透水面集水区两部分,模拟区域地表高程设置如图 1 所示。图 1 中,黑色虚线框内的区域为透水面部分,即生物滞留单元,其余部分均为不透水面,不透水面汇集区的坡度为 1%。设置溢流口高程高于透水面 0.2 m,以模拟生物滞留单元的地表蓄水层,即只有生物滞留单元的积水深度超过 0.2 m 时,才能在溢流口处形成出流。生物滞留单元的面积为 34 m²,约占汇水区总面积的 1/20,符合住建部《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)》的规定。模型模拟的水平方向空间精度为 1 m。

生物滞留单元内部结构设置为上层填料层、下层砾石层两层。其中,上层填料层为 0.5 m 厚壤土,下层砾石层厚度为 0.3 m,壤土及砾石的土壤水动力参数参考相关文献^[17-18]的经验

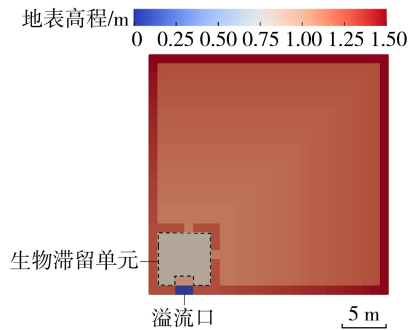


图 1 生物滞留汇水区地表高程

Fig.1 Land surface elevation of bioretention catchment

值确定(表1)。垂直方向上将模拟区域离散为6层进行模拟,自地表向下的逐层深度为0.05、0.10、0.15、0.20、0.15、0.15 m。生物滞留单元的植被类型设置为灌木,植被根系分布参数 a 和 b 分别设置为12.57、8.20^[19]。模拟区域底部设置为恒定零水头边界,以模拟砾石层的排水效应。

表1 生物滞留单元土壤水动力参数
Table 1 Soil hydrodynamic parameters of bioretention cell

土层	饱和含水量	残余含水量	饱和导水率/(m/h)	α/m^{-1}	n
填料层(壤土)	0.43	0.08	0.01	3.6	1.56
砾石层	0.35	0.03	1.44	24.4	2.49
不透水面	0.001	0.0005	1×10^{-6}	4.0	2.50

参考我国不同海绵城市建设试点城市的气象条件设置8种气象情景。8种气象情景分别以白城市(BC)、北京市(BJ)、重庆市(CQ)、青岛市(QD)、三亚市(SY)、深圳市(SZ)、武汉市(WH)、西宁市(XN)2020年的逐小时降水、辐射、风速、温度、湿度、气压数据作为模型输入,数据来源为ERA5-Land(<https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-land>)。不同气象情景的年降水量及潜在蒸散量见表2。初始土壤湿度分布通过代表性土柱预模拟结果确定。代表性土柱与生物滞留单元具有相同的土壤、植被参数。选取BC、BJ、CQ、QD、SY、SZ、WH、XN 8座城市的2010—2019年逐小时气象数据,驱动ParFlow-CLM开展预模拟,并将预模拟稳定后的土壤湿度空间分布作为正式数值模拟的初始条件。

1.3 生物滞留单元深层渗漏

本文深层渗漏特指生物滞留单元砾石层水分渗漏进入砾石层底部原土的过程,基于一定的假设与概化计算深层渗漏:对每个模拟时段,基于ParFlow-CLM的模拟结果可计算得到砾石层底部边界的排水速率,假定砾石层排水中超出原土渗漏能力(f)的部分迅速经由砾石层盲管排出生物滞留单元形成地下径流,剩余部分则形成深层渗漏;当砾石层底部边界排水速率小于渗漏能力时,则所有排水全部形成深层渗漏。此外,假定生物滞留单元底部原土的渗漏能力恒定,不随时间变化。共考虑了4种渗漏能力情景: $f=0, 2, 5, 10\text{ mm/h}$,其中 $f=0\text{ mm/h}$ 情景对应生物滞留单元经过防渗漏处理的情况; $f=2\text{ mm/h}$ 情景大致等于黏土的经验饱和导水率^[17]; $f=10\text{ mm/h}$ 情景大致等于本文中生物滞留单元填料层的饱和导水率。

2 结果与分析

2.1 地表径流

生物滞留单元的地表径流是指从溢流口排出的径流。图2为不同气象情景下,模拟年内所有降雨场次地表径流系数的频次分布。各气象情景的大部分降雨场次的地表径流系数均在0~0.1的范围内,表明生物滞留单元能较好地控制常规降雨事件中的雨水径流,不发生溢流。但是,地表径流系数整体的密度分布与模拟年的干旱程度(以模拟年年潜在蒸散量与年降水量的比值(E_p/P)表示)相关性较弱。部分气象条件差异较大的情景有着相似的地表径流系数密度分布,如BJ与SZ、QD与SY。由图3(a)(b)可知,年地表径流系数与年降水量、 E_p/P 相关性较弱,线性回归的决定系数 R^2 分别仅为0.18、0.11。该现象主要由生物滞留单元的内部结构特征所致:底部砾石层可持续排出土壤重力水,填料层能够长期维持稳定的下渗能力。在此条件下,生物滞留单元产生溢流的关键取决于降雨强度,而非降雨

表2 不同气象情景年降水量及年潜在蒸散量
Table 2 Annual precipitation and annual potential evapotranspiration under different meteorological scenarios

气象情景	年降水量/mm	年潜在蒸散量/mm
BC	629.16	1766.04
BJ	423.36	1626.35
CQ	1353.31	1108.09
QD	962.27	1486.99
SY	1858.13	2449.22
SZ	1537.32	2230.98
WH	1984.83	1275.66
XN	614.14	1431.62

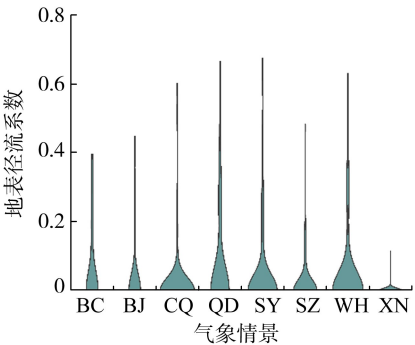


图2 不同气象情景下生物滞留单元场次降雨地表径流系数统计

Fig. 2 Statistics of event-based surface runoff coefficients of bioretention cell under different meteorological scenarios

总量,因此地表径流系数与年降水量、 E_p/P 的线性关联程度较低。若生物滞留单元不具备砾石排水层,则地表径流将表现出较强的蓄满产流特性,地表径流量将主要受降雨总量的影响^[11]。图 3(c) 中各降雨场次的平均最大 1 h 降水量一定程度上能代表降雨强度,可以看出,年地表径流系数与不同气象情景下各降雨场次的平均最大 1 h 降水量呈现较强的正相关性,线性回归的 R^2 达到 0.76。综上,带有砾石排水层的生物滞留单元的地表径流量主要与降雨场次的降雨强度相关,受降雨总量、干旱程度的影响较小。

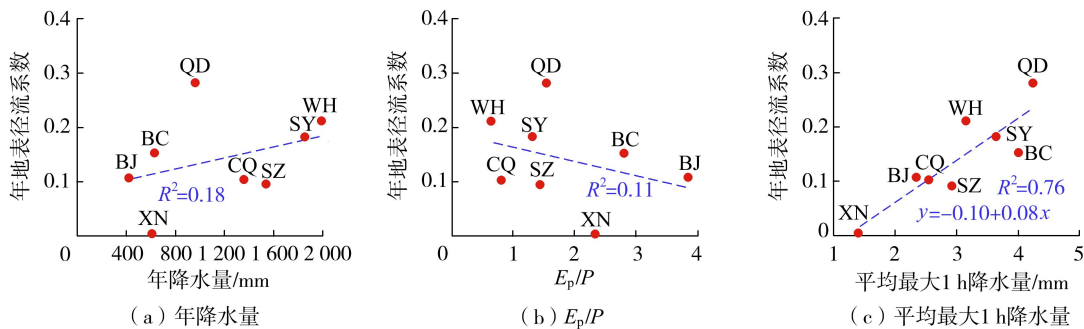


图 3 年地表径流系数与主要水文气象因子的关系

Fig. 3 Relationship between annual surface runoff coefficient and major hydrometeorological factors

2.2 地下径流及深层渗漏

生物滞留单元产生的地下径流,经填料层渗滤与吸附净化作用,水质显著优于地表径流,可收集回用于绿地灌溉、道路清扫、市政冲厕等场景,实现雨水资源化利用^[20-21]。不同的原土渗漏能力下,各气象情景的年地下径流系数如图 4 所示。当 $f=0\text{ mm/h}$ 时,各气象情景的年地下径流系数分布范围为 0.44~0.64,远大于地表径流系数。年地下径流系数与各气象条件因子的关系随渗漏能力的变化而变化。当 $f=0\text{ mm/h}$ 时,年地下径流系数与年降水量、 E_p/P 基本不相关,而与平均最大 1 h 降水量呈一定的负相关关系。随着渗漏能力的增大,年地下径流系数与平均最大 1 h 降水量的关系先转变为不相关,后逐渐表现出一定的正相关关系。当渗漏能力增加至 2 mm/h 以上时,地下径流系数与年降水量开始表现出一定的正相关性,与 E_p/P 也表现出弱相关性。

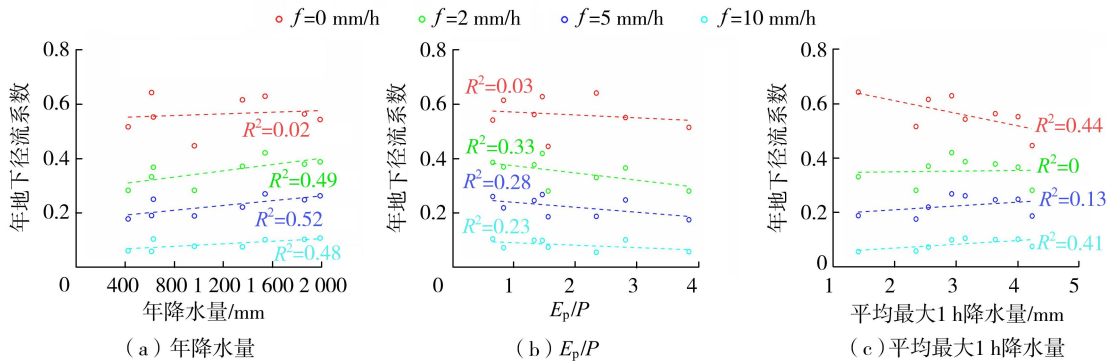


图 4 年地下径流系数与主要水文气象因子的关系

Fig. 4 Relationship between annual subsurface runoff coefficient and major hydrometeorological factors

图 4(c) 所呈现的变化特征,是降雨强度对地下径流产生双重效应共同作用的结果:①降雨强度越大时,生物滞留单元越容易形成溢流(图 3),总下渗及地下径流随之减少,即溢流效应;②降雨强度增大,易在生物滞留单元表面积水并形成水头压力,加速填料层土壤水下渗并快速排出,使填料层排水速率超过原土渗漏能力,进而产生地下径流,即地下超渗效应。当原土渗漏能力较弱时,溢流效应占据主导;随渗漏能力逐步提升,地下超渗效应的作用不断增强,且在 f 达到 2 mm/h 时,两类效应的影响基本持平。渗漏能力继续提高后,地下超渗效应应逐步成为主导控制因素。

干旱程度对地下径流的影响也与填料层排水速率有关。气象条件越湿润、土壤越饱和,越有利于降雨期间填料层排水速率超出渗漏能力,从而促进地下径流的形成,导致图 4 中地下径流与年降水量的正相关性以及 E_p/P 的负相关性。特别是 $f=0\text{ mm/h}$ 时,地下径流的形成只与填料层排水总量相关,而不再受填料层

排水速率的影响,即与干旱程度无关,导致图 4 中 $f=0\text{ mm/h}$ 时,地下径流与年降水量、 E_p/P 基本不相关。

深层渗漏是生物滞留汇水区地下水补给的主要来源。由图 5 可知,所有气象情景的生物滞留单元的深层渗漏总量均较为可观。当 $f=10\text{ mm/h}$ 时,不同气象情景下的年深层渗漏量与年降水量的比值(D_d/P)可达到 $0.37\sim0.58$;即使当 $f=2\text{ mm/h}$ 时,不同气象情景下的 D_d/P 也可达到 $0.16\sim0.31$,与地表径流系数相近。 D_d/P 主要与平均最大 1 h 降水量有关,而与年降水量、 E_p/P 的相关性较弱。原因在于:渗漏总量主要受控于填料层总出流量,与填料层排水速率的关联性较弱,因此渗漏总量受干旱程度的影响有限。结合前文分析可知,填料层总出流量主要由降雨强度决定,这也使得最大 1 h 降水量成为深层渗漏的主要水文气象因子。

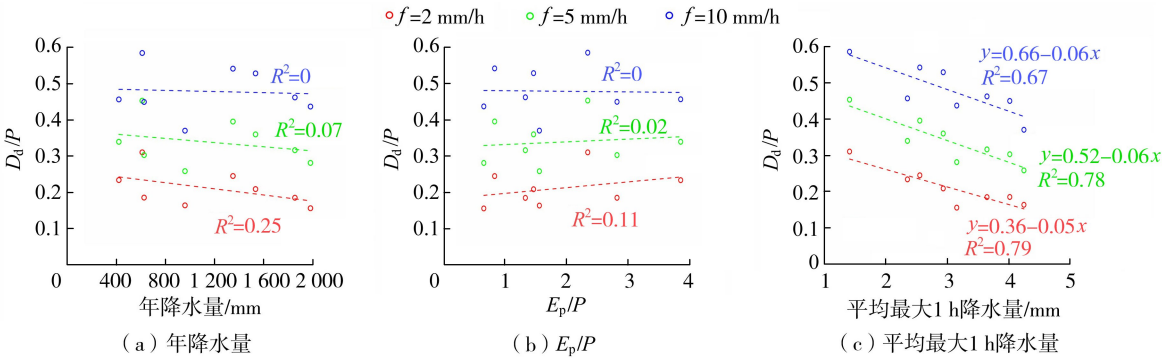


图 5 不同渗漏能力情景下 D_d/P 与主要水文气象因子的关系

Fig. 5 Relationship between D_d/P and major hydrometeorological factors under different seepage capacity scenarios

2.3 蒸散发

不同气象情景下生物滞留单元总蒸散量与汇水区年降水量的比值($E_{a,c}/P$)差异明显,且随着 E_p/P 的增加而增加(图 6)。 $E_{a,c}/P$ 与 E_p/P 表现出较强的相关性,线性拟合的 $R^2=0.78$,这一强线性相关关系与传统的 Budyko 理论框架有较大差异,是生物滞留单元的汇集特性导致的。根据 Budyko 框架,流域多年平均蒸散发系数与干旱指数之间为极强非线性关系:当干旱指数小于 0.5 时,蒸散发系数基本随干旱指数线性增加;当干旱指数持续增长至 0.5 以上时,蒸散发系数随之增长的增长率逐渐降低;当干旱指数位于 1.0~2.0 范围时,蒸散发系数与干旱指数呈现明显的非线性关系;随着干旱指数持续增加,蒸散发系数无限逼近于 1.0^[22]。而图 6 中,在 E_p/P 位于 0.5~4.0 的范围内时, $E_{a,c}/P$ 基本随 E_p/P 线性增加,这是因为,在生物滞留汇水区,生物滞留单元的水量输入除了其上方降水外,还包括不透水面汇集区的大量地表径流。例如,本文生物滞留单元的汇集比为 20:1,模型计算的不透水面年蒸发量约占其上方降水的 20%,这一比例也与 Ragab 等^[23]的试验计算结果接近,则生物滞留单元的年水量输入约为其上方降水的 3.8 倍。若定义潜在蒸散发与实际输入水量的比值为生物滞留单元的干旱指标(A_c),则当 E_p/P 位于 0.5~4.0 的范围内时(图 6), A_c 大致位于 0.13~1.05 的范围。在这一范围内,由于供水较为充足,实际蒸散发主要取决于蒸散能力, $E_{a,c}/P$ 与 E_p/P 也因此近似呈现线性相关关系。

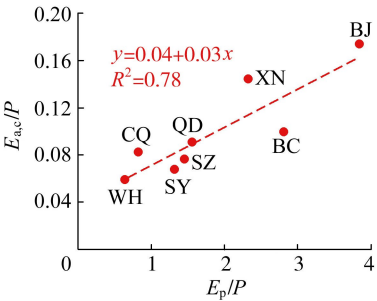


图 6 $E_{a,c}/P$ 与 E_p/P 的关系

Fig. 6 Relationship between $E_{a,c}/P$ and E_p/P

3 结 论

- a. 生物滞留单元的地表径流量主要受各降雨场次的平均降雨强度影响,而与年降水量、干旱程度等因素基本不相关。
- b. 生物滞留单元地下径流量受到地表溢流效应与地下超渗效应的共同影响。当生物滞留单元下方原土渗漏能力较低时,地表溢流效应占主导地位,地下径流量与平均降雨强度呈一定的负相关关系;随着原土渗漏能力增加,地下超渗效应逐渐占主导地位,地下径流量与平均降雨强度逐渐由负相关关系转变为不相关,进一步转变为正相关关系。
- c. 生物滞留单元的深层渗漏主要取决于填料层出流总量,出流总量主要取决于地表径流量,因此深层

渗漏与平均降雨强度呈较强负相关关系,而与年降水量、干旱程度的相关性较弱。

d. 由于生物滞留汇水区的径流汇集作用,生物滞留设施的供水比自然情况下更充足,其实际蒸散发更加依赖于不同气象条件下的蒸散能力,生物滞留单元的蒸散发系数($E_{a,c}/P$)与干旱程度(E_p/P)因此呈现近似线性的关系。

参考文献:

[1] 张文龙,张守红,张建军. 生物滞留系统径流与水质调控效应研究进展[J]. 应用生态学报,2023,34(1):264-276. (Zhang Wenlong,Zhang Shouhong,Zhang Jianjun. Stormwater quantity and quality control performance of bioretention systems: a literature review [J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2023,34(1):264-276. (in Chinese))

[2] Davis A P,Hunt W F,Traver R G,et al. Bioretention technology:overview of current practice and future needs[J]. Journal of Environmental Engineering,2009,135:109-117.

[3] Liang C,Zhang X,Xu J,et al. An integrated framework to select resilient and sustainable sponge city design schemes for robust decision making [J]. Ecological Indicators,2020,119:106810.

[4] Huang F,Harman C J,Hobbs B F,et al. Assessment of climate,sizing,and location controls on green infrastructure efficacy:a timescale framework [J]. Water Resources Research,2020,56(5):e2019WR026141.

[5] Hdeib R,Aouad M. Rainwater harvesting systems:an urban flood risk mitigation measure in arid areas[J]. Water Science and Engineering,2023,16(3):219-225.

[6] 蒋春博,李家科,李怀恩. 生物滞留系统处理径流营养物研究进展[J]. 水力发电学报,2017,36(8):65-77. (Jiang Chunbo,Li Jiake,Li Huaen. Advances in studies on bioretention systems for purifying runoff nutrients [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2017,36(8):65-77. (in Chinese))

[7] 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. (Qiu Fuguo,Chen Lixia. Research progress on contaminants removal from stormwater runoff by bioretention [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering,2016,10(4):1593-1602. (in Chinese))

[8] 李海燕,罗艳红,张悦. LID 措施在道路雨水利用工程中的应用[J]. 节水灌溉,2013(11):44-49. (Li Haiyan,Luo Yanhong,Zhang Yue. Application of LID in road runoff utilization engineering [J]. Water Saving Irrigation,2013(11):44-49. (in Chinese))

[9] 孔东莲,田露,袁普金,等. 我国南方城市建设项目雨水集蓄利用措施及其配置模式[J]. 中国水土保持,2018(4):15-19. (Kong Donglian,Tian Lu,Yuan Pujin,et al. Storage and infiltration measures of rainwater and its allocation modes of city construction projects in southern China [J]. Soil and Water Conservation in China,2018(4):15-19. (in Chinese))

[10] 肖婉婷,宋聚生,马翔,等. 基于 SWMM 的校园海绵城市布局优化研究:以深圳市某中学校园为例[J]. 水利水电技术(中英文),2023,54(9):48-60. (Xiao Wanting,Song Jusheng,Ma Xiang,et al. Optimization of LID facilities planning strategy based on PSO algorithm and SWMM model:a case study of middle school campus in Shenzhen [J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2023,54(9):48-60. (in Chinese))

[11] Wang Yao,Zhang Xiang,Gong Li,et al. On the relationship between surface runoff and impervious area in the urban RPA (receiving pervious area)-DIA (disconnected impervious area) system:a simple equation expressing the sensitivity of runoff to changes in imperviousness [J]. Journal of Hydrology,2024,631:130836.

[12] Palla A,Gnecco I. Hydrologic modeling of low impact development systems at the urban catchment scale [J]. Journal of Hydrology,2015,528:361-368.

[13] 王恺,章孙逊,张守红. 基于 Hydrus-1D 不同气候区城市绿色屋顶径流调控效益研究[J]. 环境科学学报,2023,43(3):195-205. (Wang Kai,Zhang Sunxun,Zhang Shouhong. Hydrological performances of green roofs in different climates based on Hydrus-1D simulation [J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2023,43(3):195-205. (in Chinese))

[14] Voter C B,Loheide S P. Climatic controls on the hydrologic effects of urban low impact development practices [J]. Environmental Research Letters,2021,16:064021

[15] 崔瑞君,侯精明,王雁鸿,等. 小区绿色屋顶改造对径流的影响[J]. 水利水电科技进展,2025,45(4):94-101. (Cui Ruijun,Hou Jingming,Wang Yanhong,et al. Effects of green roof retrofitting in residential communities on runoff[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2025,45(4):94-101. (in Chinese))

[16] Kollet S J,Maxwell R M. Integrated surface-groundwater flow modeling:a free-surface overland flow boundary condition in a parallel groundwater flow model [J]. Advances in Water Resources,2006,29(7):945-958.

[17] Carsel R F,Parrish R S. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics [J]. Water Resources

Research,1988,24(5):755-769.

[18] Mace A,Rudolph D L,Kachanoski G. Suitability of parametric models to describe the hydraulic properties of an unsaturated coarse sand and gravel [J]. Groundwater,1998,36(3):465-475.

[19] Zeng X B. Global vegetation root distribution for land modeling[J]. Journal of Hydrometeorology,2001,2(5):525-530.

[20] 贾斌凯,李怀恩,黄绵松,等. 固原市玫瑰苑小区低影响开发措施改造对降雨径流的调控效益[J]. 水土保持通报,2020,40(1):130-135. (Jia Binkai,Li Huaen,Huang Miansong,et al. Regulation and control benefits of rainfall-runoff by low impact development measures in a residential district of Guyuan city[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2020,40(1):130-135. (in Chinese))

[21] 路琪儿,罗平平,虞望琦,等. 城市雨水资源化利用研究进展[J]. 水资源保护,2021,37(6):80-87. (Lu Qier,Luo Pingping,Yu Wangqi,et al. Research progress of urban rainwater resources utilization[J]. Water Resources Protection,2021,37(6):80-87. (in Chinese))

[22] Wang Cong,Wang Shuai,Fu Bojie. Advances in hydrological modelling with the Budyko framework;a review [J]. Progress in Physical Geography,2016,40(3):409-430.

[23] Ragab R,Rosier P,Dixon A,et al. Experimental study of water fluxes in a residential area; 2. road infiltration, runoff and evaporation [J]. Hydrological Processes,2003,17:2423-2437.

(收稿日期:2025-02-18 编辑:刘晓艳)

(上接第17页)

[27] 王文鹏,何站鹏,巫义锐,等. 基于集合卡尔曼滤波的水文模型状态变量反馈校正方法[J]. 水力发电学报,2024,43(10):17-31. (Wang Wenpeng,He Dianpeng,Wu Yirui,et al. State variable feedback-correction method of hydrological model based on ensemble Kalman filter[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2024,43(10):17-31. (in Chinese))

[28] 邓鹏鑫,王银堂,胡庆芳,等. GR4J 模型在赣江流域日径流模拟中的应用[J]. 水文,2014,34(2):60-65. (Deng Pengxin,Wang Yintang,Hu Qingfang,et al. Application of GR4J in daily runoff simulation for Ganjiang river basin[J]. Journal of China Hydrology,2014,34(2):60-65. (in Chinese))

[29] 许王辰,陈瑞弘,孙岸炜. 基于峰值导向型粒子群优化算法的城市水文模型自动率定方法[J]. 水利水电科技进展,2025,45(4):31-38. (Xu Wangchen,Chen Ruihong,Sun Anwei. Automatic calibration method for urban hydrological models based on peak-oriented particle swarm optimization algorithm[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2025,45(4):31-38. (in Chinese))

[30] 梁忠民,赵建飞,段雅楠,等. 微分形式新安江模型[J]. 水科学进展,2024,35(3):374-386. (Liang Zhongmin,Zhao Jianfei,Duan Ya'nan,et al. Differential-form Xin'anjiang model[J]. Advances in Water Science,2024,35(3):374-386. (in Chinese))

[31] Zhao Jianfei,Liang Zhongmin,Singh V P,et al. Two-dimensional differential form of distributed Xin'anjiang model [J]. Hydrology and Earth System Sciences,2025,29(15):3745-3769.

[32] Houska T,Kraft P,Chamorro-Chavez A,et al. SPOTting model parameters using a ready-made Python package[J]. PLOS ONE,2015,10(12):e0145180.

[33] 张旭,蒋卫国,周廷刚,等. GIS 支持下的基于 DEM 的水文响应单元划分:以洞庭湖为例[J]. 地理与地理信息科学,2009,25(4):17-21. (Zhang Xu,Jiang Weiguo,Zhou Tinggang,et al. Hydrological response unit division for Dongting Lake based on DEM and GIS[J]. Geography and Geo-Information Science,2009,25(4):17-21. (in Chinese))

[34] Antonetti M,Buss R,Scherrer S,et al. Mapping dominant runoff processes:an evaluation of different approaches using similarity measures and synthetic runoff simulations[J]. Hydrology and Earth System Sciences,2016,20(7):2929-2945.

[35] Fenicia F,McDonnell J J. Modeling streamflow variability at the regional scale:(1) perceptual model development through signature analysis[J]. Journal of Hydrology,2022,605:127287.

[36] Fenicia F,Meißner D,McDonnell J J. Modeling streamflow variability at the regional scale:(2) development of a bespoke distributed conceptual model[J]. Journal of Hydrology,2022,605:127286.

[37] Dal Molin M,Schirmer M,Zappa M,et al. Understanding dominant controls on streamflow spatial variability to set up a semi-distributed hydrological model:the case study of the Thur catchment[J]. Hydrology and Earth System Sciences,2020,24(3):1319-1345.

(收稿日期:2025-06-24 编辑:刘晓艳)