

DOI:10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221400

基于 SWMM 模型的绿色屋顶雨洪控制与效益分析

王 雷^{1,2,3},张少松¹,梁景坤¹,马爱华¹,安 麒¹,钱刘洋¹

(1. 河北水利电力学院, 河北 沧州 061001; 2. 河北省岩土工程安全与变形控制重点实验室, 河北 沧州 061001; 3. 河北省高校水利自动化与信息化应用技术研发中心, 河北 沧州 061001)

摘要: 水环境安全一直是困扰我国社会经济健康发展的重要问题,低影响开发技术在应对水环境安全问题方面具有良好的韧性。以沧州中欧绿色产业园为研究区域,建立该区域的暴雨雨洪模型和雨水资源利用效益化模型。研究发现,绿色屋顶对地面径流具有明显的控制作用,径流总量的削减率和控制率分别为 56.31%、68.32%,峰值流量削减率为 48.58%,对 TP、TN、SS、COD 四种污染物的控制率分别为 72.92%、74.82%、74.44%、73.89%;随着降雨强度的提高,径流控制率、污染物浓度控制率降低,分别呈现显著的四次、五次幂函数负相关关系;经测算,绿色屋顶能够产生较好的经济效益和环境效益。

关键词: SWMM;绿色屋顶;控制率;经济效益;环境效益

中图分类号: TV12;TU992

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)02-0065-04

1 引言

随着我国城镇化建设的深入推进,大量绿地被不透水下垫面替代,当遭遇高强度降雨时,极易形成大量地表径流,爆发内涝灾害。SWMM 模型提供了分布式水文模块、一维水动力模块、LID 模块等功能,已广泛应用于降水的水量和水质模拟^[1]。其中低影响开发(LID)技术能够吸纳、蓄渗和缓释雨水,对缓解城市内涝具有重要意义^[2]。然而,目前国内关于 LID 设施在不同重现期下雨水控制规律的研究大都集中在对变化趋势的简单判断,缺少对变化趋势的精确预测;同时,对 LID 设施效益的研究也鲜有涉及。鉴此,本文通过建立研究区域暴雨雨洪模型和雨水资源利用效益化模型,研究了绿色屋顶对径流总量、洪峰流量、峰现时间及污染物负荷的控制效果,精确预测了控制率的发展规律,并对绿色屋顶的经济效益和环境效益进行了全面的量化测算,旨在为绿色屋顶的推广和应用提供重要理论支持。

2 SWMM 模型构建

中欧绿色产业园位于沧州中捷高新技术产业

开发区,属于暖温带半湿润大陆性季风气候,年平均降雨量为 562.3 mm,降水集中在夏季。产业园总面积约 13.14 hm²,园区内开发强度较大,屋顶面积为 55.7%,道路面积为 31.4%,绿地面积仅为 12.9%,易出现积水内涝灾害。根据研究区域高程、管道及边界情况,将研究区域概化为 63 个子汇水区域、124 个雨水井和 1 个雨水排放口,概化结果见图 1。

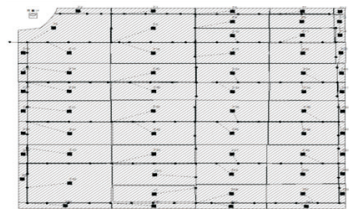


图 1 汇水区域概化图

Fig. 1 Generalized map of catchment area

2.1 设计暴雨

沧州市的暴雨强度计算公式为:

$$q = 2\,226.663(1 + 0.997 \lg P) / (t + 9.596)^{0.731} \quad (1)$$

式中, q 为平均雨强,mm/h; P 为降雨重现期,a; t 为降雨历时,min。

利用芝加哥雨型建立设计降雨过程曲线,设

收稿日期:2022-07-10,修回日期:2022-09-06

基金项目:2020 年河北省高等学校自然科学研究青年基金项目(QN2020174);2020 年度河北省水利科研与推广计划项目(2020-63);2021 年度河北水利电力学院基本科研业务费项目(SYKY2111)

作者简介:王雷(1986-),男,硕士、副教授,研究方向为海绵城市及低影响开发技术、海绵城市推进政策机制, E-mail:leiwangtiger@126.com

置雨峰比例 $r=0.4^{[3]}$, 降雨历时 $t=120$ min, 1、2、5、10 年重现期降雨量分别为 45.80、59.58、77.80、91.50 mm。

2.2 参数输入与率定

因产业园竣工时间不长, 缺少排放口流量等实测数据, 采用径流系数法^[4]校核下渗速率、曼宁系数等模型参数。研究区域不透水面积比例为 87.1%, 根据表 1 判断该区域属城镇建筑密集居住区^[4]。经反复调参率定后, 1 年降雨重现期时径流系数为 0.725, 2、3 年重现期时径流系数分别为 0.778、0.800, 均介于 0.60~0.85 之间。说明研究参数具有较高的稳定性, 可得到较为准确的结果。率定后研究区域模型参数取值见表 2。

表 1 综合径流系数

Tab. 1 Comprehensive runoff coefficient

区域情况	不透水面积比例/%	综合径流系数
城镇建筑密集区域	>70	0.6~0.85
城镇建筑较密集区域	50~70	0.5~0.70
城镇建筑比较稀少居住区	30~50	0.4~0.60
城镇建筑稀少居住区	<30	0.3~0.50

表 2 率定后参数

Tab. 2 The parameters after calibration

参数类型	参数名称	参数选取范围	研究区选择值
注蓄量参数	不透水区注蓄水量/mm	1.27~2.54	2.4
	透水区注蓄水量/mm	3.6~10.5	10
曼宁粗糙率参数	不透水区曼宁糙率	0.012~0.025	0.025
	透水区曼宁糙率	0.08~0.24	0.2
	管道曼宁糙率	0.012~0.014	0.013
Horton 公式	最大入渗率	66.3~78.1	68
	最小入渗率	7.1~7.8	7.5
	衰减系数/h ⁻¹	2~4	4

2.3 研究区域排水能力评估

该产业园在 1 年重现期时没有节点积水, 满载管渠仅占 67.7%; 2 年重现期时有 19 个积水节点, 积水总量为 146 m³, 满载管渠接近 100%; 5 年重现期时有 43 个积水节点, 积水总量为 692 m³, 管渠全部为满载状态; 10 年重现期时积水节点最多, 达到 48 个, 积水总量为 1 299 m³, 见表 3。由表 3 可知, 研究区管网在 1 年重现期时具有较好的承载能力, 但随着降雨强度的提高, 径流量超过管网承载能力, 出现积水。

表 3 管渠满载和积水情况

Tab. 3 Full load and waterlogged condition of the canal

重现期/a	积水点数量/个	数量占比/%	最大积水量/m ³	总积水量/m ³	满载管渠数量/根	占总管渠比例/%	管渠最大满载时间/min
1	0	0	0	0	84	67.7	25.8
2	19	15.3	30	146	117	94.4	36.0
5	43	34.7	82	692	124	100.0	47.4
10	48	38.7	111	1 299	124	100.0	54.3

3 绿色屋顶径流量影响分析

3.1 绿色屋顶土壤层土质分析

绿色屋顶结构分表面层、土壤层、排水层, 其中表面层护堤高度为 200 mm, 植被覆盖率为 0.95, 表面粗糙率为 0.24, 表面坡度为 5%; 为探寻适合绿色屋顶土壤层的最佳土质类型, 建立了沙土、粘土、壤土 3 种不同土壤基质模型(表 4); 排水层厚度为 150 mm、孔隙比为 0.5, 粗糙率为 0.013。研究了 1 年重现期, 50%绿色屋顶改造率条件下的径流控制情况, 结果见图 2。由图 2 可知, 土壤层为沙土时, 绿色屋顶对径流量的削减率最大, 达 27.98%, 壤土其次, 为 22.79%, 粘土最低, 仅 6.32%。

表 4 绿色屋顶结构层中土壤层设计参数

Tab. 4 Design parameters of soil layer in green roof of structure

参数	粘土	沙土	壤土
厚度/mm	200	200	200
孔隙率	0.475	0.437	0.463
产水能力	0.378	0.062	0.232
枯萎点	0.265	0.024	0.116
导水率 mm/h	0.254	120.396	3.302
导水率坡比	10	10	10
吸水头/mm	320.04	49.022	88.9

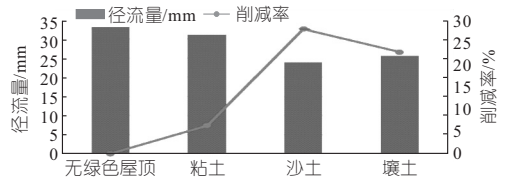


图 2 绿色屋顶不同土壤层土质类型对应的径流量及径流削减率图

Fig. 2 Figure of runoff and runoff reduction rate corresponding to soil types in different soil layers of green roof

3.2 绿色屋顶对径流量影响分析

3.2.1 径流削减率影响分析

由于园区屋顶防水等级采用 II 级设防, 屋面现状良好, 为研究绿色屋顶的最佳雨水控制效果, 设计了沙质土壤基质、100%改造率条件下的绿色屋顶设计方案, 研究重现期为 1、2、5、10 年四种降雨强度条件下的径流控制规律。排放口处的径流量时间变化曲线见图 3, 设置绿色屋顶后, 排放口径流量大幅减少, 1 年重现期时径流总量削减 56.31%, 峰值削减 48.58%; 然而, 随着降雨重现期的增大, 削减幅度降低; 2 年重现期时径流总量削减 56.08%, 峰值削减 49.56%; 5 年重现期时径流总量削减 55.95%, 峰值削减 48.28%; 10 年重现期时径流总量削减 55.89%, 峰值削减 47.73%。

表 5 为改造前后不同重现期排放口流量、径流系数、积水节点统计。由表 5 知, 10 年重现期内, 绿色屋顶改造前径流系数均在 0.7 以上, 绿色屋顶改造后径流系数均控制在 0.4 以下, 峰现时

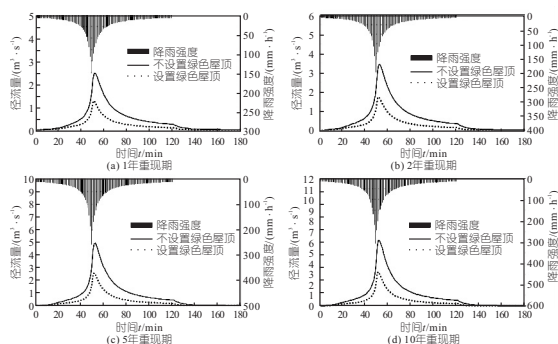


图 3 不同重现期降雨—径流量时间过程曲线
Fig. 3 Time process curves of rainfall-runoff under different return periods

表 5 排放口流量、径流系数、积水节点统计表

Tab. 5 Discharge outlet flow, runoff coefficient, water node statistics table

重现期/年	径流量/m ³		洪峰流量/(m ³ ·s ⁻¹)		峰现时刻/min		径流系数		改造后积水节点数
	改造前	改造后	改造前	改造后	改造前	改造后	改造前	改造后	
1	4 365.58	1 907.36	2.47	1.27	0:52	0:51	0.73	0.32	0
2	6 090.41	2 674.64	3.43	1.73	0:52	0:51	0.78	0.34	0
5	8 391.21	3 696.32	4.95	2.56	0:52	0:51	0.82	0.36	4
10	10 139.17	4 472.15	6.18	3.23	0:52	0:51	0.84	0.37	13

表 6 不同降雨重现期下径流控制率

Tab. 6 Runoff control rate under different rainfall return periods

降雨重现期/a	降雨量/mm	降水总量/m ³	排水量/m ³	径流控制率/%
1	45.82	6 021.43	1 907.36	68.32
2	59.58	7 828.66	2 674.64	65.84
5	77.76	10 217.62	3 696.33	63.82
6	81.37	10 693.05	3 900.27	63.53
8	87.08	11 442.98	4 222.08	63.10
10	91.51	12 024.85	4 472.15	62.81
15	99.55	13 081.88	4 926.81	62.34
20	105.26	13 831.95	5 249.55	62.05

采用回归分析法对降雨量和径流控制率模拟结果的关系进行线性函数、二次幂函数、三次幂函数、四次幂函数及指数函数曲线拟合, R² 值分别为 0.951 25、0.998 21、0.999 96、1、0.957 14, 拟合函数曲线见图 4。

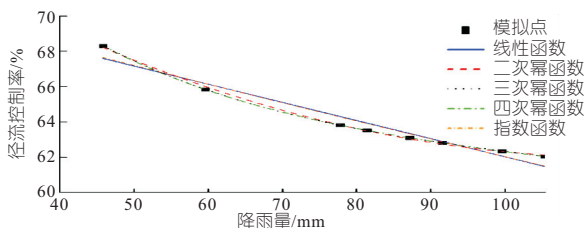


图 4 降雨量与径流控制率拟合函数曲线

Fig. 4 Rainfall and runoff control rate fitting function curves

由表 6、图 4 可知, 降雨量与径流控制率模拟结果使用四次函数后, 决定系数为 1, 回归曲线对观测值的拟合程度达到最佳, 同时各拟合函数都表征了径流控制率与降雨量的负相关性, 与实际情况相吻合。

刻延迟了 1 min; 同时, 重现期为 1、2 年时不积水, 5 年时有 4 个积水节点, 但积水总量仅 17 m³, 由此可见绿色屋顶改造后园区防洪能力由 1 年提高到 5 年。

3.2.2 径流控制率影响分析

径流控制率计算公式^[5]为:

$$R = [(W - V_{\text{排}}) / W] \times 100\% \quad (2)$$

式中, R 为径流控制率; W 为研究区域降水总量; V_排 为研究区对应降雨的总排出水量。对不同降雨重现期条件下的径流过程进行数值模拟, 计算径流控制率结果见表 6。

3.3 绿色屋顶对径流水质影响分析

研究区域的径流污染物选择常规污染物 TP、TN、SS、COD, 天然雨水中这 4 种污染物浓度取值分别为 0.088、1、10、20 mg/L^[6]。污染物的积累模型和冲刷模型均选择指数函数, 研究区域不同土地利用类型的污染物积累及冲刷模型参数^[6,7]见表 7。

表 7 不同土地利用类型的污染物积累模型及冲刷模型参数

Tab. 7 Pollutant accumulation model and scour model parameters of different land use types

参数类型	土地利用类型	参数名称	TP	TN	SS	COD
累积参数	绿地	最大增长	0.6	10	60	40
		速率常数	0.03	0.5	3	2
	屋顶	最大增长	0.2	4	140	80
		速率常数	0.01	0.2	7	4
	铺装	最大增长	0.2	6	270	170
		速率常数	0.01	0.3	13.5	8.5
冲刷参数	绿地	冲刷系数	0.1	0.2	0.04	0.05
		冲刷指数	1.2	1.2	1.2	1.2
	屋顶	冲刷系数	0.02	0.04	0.07	0.06
		冲刷指数	1.7	1.7	1.8	1.8
	铺装	冲刷系数	0.002	0.004	0.008	0.007
		冲刷指数	1.7	1.7	1.8	1.8

注: 最大增长单位为 kg/hm²。

图 5 为 1 年重现期下降雨—污染物浓度时间过程线。由图 5 可知, 1 年重现期下研究区域产生的污染物总量为 SS>COD>TN>TP, 进行绿色屋顶改造后, TP、TN、SS、COD 四种污染物的控制率分别为 72.92%、74.82%、74.44%、

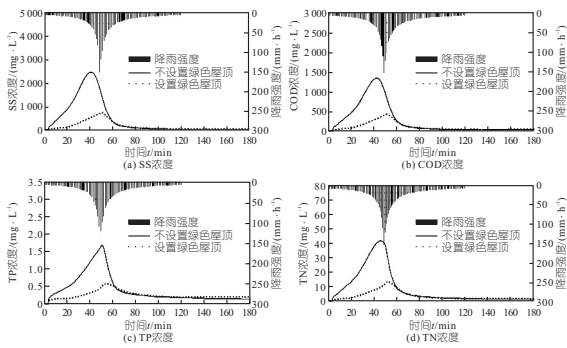


图5 1年重现期下降雨-污染物浓度时间过程曲线
Fig. 5 Time process curves of rainfall and pollutant concentration in one year return period

73.89%，说明绿色屋顶对径流水质具有良好的控制作用。

分别拟合降雨量与4种污染物控制率的关系，比较线性函数、幂函数及指数函数发现，五次幂函数时4种污染物浓度变化规律的拟合度达到最佳， R^2 值分别为0.999 65、0.999 76、0.999 99、0.999 97。表明随着重现期的增大，降雨量逐渐增大，绿色屋顶对4种污染物浓度的控制率均下降，但降幅不同。

4 绿色屋顶雨水资源效益化模型

4.1 经济效益

4.1.1 雨水资源利用收益

绿色屋顶能够对径流雨水进行滞留、储存，经简单处理后可用于灌溉、洗车等用途，可近似用中水市场价格法计算雨水资源利用收益 $E_{用}$ ，计算公式为：

$$E_{用} = V_{用} P_{中水} \quad (3)$$

式中， $V_{用}$ 为园区内雨水年可利用量，经计算为45 432 m^3 ； $P_{中水}$ 为当地中水的价格，元/ m^3 ，经查询为4.5元/ m^3 。

4.1.2 节约市政排水设施运行费用

绿色屋顶通过对径流总量的削减，大幅降低了区域外排量 $V_{排}$ ，进而减轻城市雨水管网的压力，降低市政管网的维护费用 $E_{节约}$ ，计算公式分别为：

$$V_{排} = \varphi_{前} WRF \quad (4)$$

$$E_{节约} = V_{排} P_{管网} \quad (5)$$

式中， $\varphi_{前}$ 为绿色屋顶改造前园区径流系数，经计算为0.725； W 为年均降水量，经查询为570.3 mm； R 为园区年均径流总量削减率，采用单场径流总量削减率56.3%计算； F 为园区汇水面积，为13.14 hm^2 ； $V_{排}$ 为减少排放的雨水量，经计算

为30 594 m^3 ； $P_{管网}$ 为管网运行及水处理费用，取1.63元/ m^3 。

4.1.3 节约污水处理费用

绿色屋顶对污染物具有良好的控制效果，可降低水体污染产生的污水处理费用 $E_{损失}$ ， $E_{损失}$ 采用市场价值法计算：

$$E_{损失} = V_{排} P_{污水} / \alpha \quad (6)$$

式中， $P_{污水}$ 为污水处理费用，用排污费用来替代，为1.1元/ m^3 ； α 为环境治理的投入产出比，取1/3。

经计算，绿色屋顶雨水资源效益中其经济效益指标 $E_{用} = 204 444$ 元， $E_{节约} = 49 868$ 元， $E_{损失} = 100 960$ 元。

4.2 环境效益

4.2.1 固碳释氧效益

利用碳税法及绿地成本法计算吸收 CO_2 的效益 $E_{碳}$ ，利用工业制氧法和绿地成本法计算释放 O_2 的效益 $E_{氧}$ ，计算公式分别为：

$$E_{碳} = Q_{碳} P_{碳} F_{绿} \quad (7)$$

$$E_{氧} = Q_{氧} P_{氧} F_{绿} \quad (8)$$

式中， $Q_{碳}$ 为绿地固碳量，取16 t/($hm^2 \cdot a$)； $P_{碳}$ 为碳税率，取1 023元/t； $F_{绿}$ 为绿色屋顶面积，为7.314 hm^2 ； $Q_{氧}$ 为绿地释氧量，取12 t/($hm^2 \cdot a$)； $P_{氧}$ 为工业氧批发价，取400元/t^[8]。

4.2.2 净化空气效益

绿色植物还具有吸收空气中二氧化硫等有害气体，吸附粉尘的作用，计算公式为：

$$E_{SO_2} = Q_{SO_2} P_{SO_2} F_{绿} \quad (9)$$

$$E_{尘} = Q_{尘} C_{尘} F_{绿} \quad (10)$$

式中， Q_{SO_2} 为单位面积植被二氧化硫吸收量，取140.62 kg/($hm^2 \cdot a$)^[8]； P_{SO_2} 为二氧化硫排污权价格，取600元/t； $Q_{尘}$ 为单位面积植被滞尘量，取10.9 t/($hm^2 \cdot a$)； $C_{尘}$ 为消减尘土的治理成本，取1.5元/t。

4.2.3 降噪效益

绿色屋顶的建设能够增加城市的植物量，增加吸附声波的表面，起到降低噪声污染的作用 $E_{降噪}$ ，计算公式为：

$$E_{降噪} = P_{降噪} F_{绿} \quad (11)$$

式中， $P_{降噪}$ 采用影子工程法计算，绿地降噪价值为156 033元/($hm^2 \cdot a$)^[9]。

经计算，绿色屋顶雨水资源效益中，其环境效益指标 $E_{碳} = 119 716$ 元， $E_{氧} = 35 107$ 元， $E_{SO_2} = 617 097$ 元， $E_{尘} = 120$ 元。

5 结论

研究区域进行绿色屋顶改造后,设计降雨重现期可从 1 年提高到 5 年,并且产生了良好的经济和社会效益。研究发现,沙土是绿色屋顶土壤层的最佳土质类型;绿色屋顶径流控制率与降雨量存在显著的四次幂函数负相关规律,TP、TN、SS、COD 四种污染物控制率与降雨量之间存在显著的五次幂函数负相关规律,该研究可为绿色屋顶的设计规划提供精确指导。

参考文献:

- [1] 卡地尔亚·库尔班,魏强,张健,等. 海绵机场雨水径流仿真模拟[J]. 水电能源科学,2022,40(3):35-37.
- [2] 赵沛,程伍群,庞立军,等. 基于 SWMM 的透水铺装系统的水文效应研究[J]. 水电能源科学,2019,37(1):29-31.

- [3] 王雷,杨凤阁,五诚杰,等. 基于 SWMM 模型的低影响开发模式在城市雨洪控制中的研究[J]. 中国农村水利水电,2019(5):83-86.
- [4] 刘兴坡. 基于径流系数的城市降雨径流模型参数校准方法[J]. 给水排水,2009,35(11):213-217.
- [5] 侯精明,李东来,王小军,等. 建筑小区尺度下 LID 措施前期条件对径流调控效果影响模拟[J]. 水科学进展,2019,30(1):45-55.
- [6] 刘小壮. 基于 SWMM 建筑小区 LID 方案比选及水量水质的模拟评估[D]. 长沙:湖南大学,2018.
- [7] 熊子鹰,肖存艳,蔡甜,等. 基于 SWMM 的初期雨水调蓄池容积确定及截污效能模拟[J]. 水电能源科学,2019,37(1):36-39.
- [8] 王恩,章银柯,林佳莎,等. 杭州西湖风景区绿地货币化生态效益评价研究[J]. 西北林学院学报,2011,26(1):209-213.
- [9] 陈龙,谢高地,盖力强,等. 道路绿地消减噪声服务功能研究:以北京市为例[J]. 自然资源学报,2011,26(9):1526-1534.

Stormwater Control and Benefit Analysis of Green Roof Based on SWMM Model

WANG Lei^{1,2,3}, ZHANG Shao-song¹, LIANG Jing-kun¹, MA Ai-hua¹, AN Qi¹, QIAN Liu-yang¹

(1. Hebei University of Water Resources and Electric Engineering, Cangzhou 061001, China; 2. Hebei Key Laboratory of Geotechnical Engineering Safety and Deformation Control, Cangzhou 061001, China; 3. Water Resources Automation and Information Application Technology Research and Development Center of Hebei College, Cangzhou 061001, China)

Abstract: Water environment safety has always been an important issue that plagues the healthy development of country's social economy. Low-impact development technologies have good resilience in dealing with water environment safety issues. Taking Cangzhou China-Europe Green Industrial Park as the research object, the rainstorm flood model and the rainwater resource utilization benefit model were established. The study found that green roofs have an obvious control effect on ground runoff. The reduction rate and control rate of the total runoff are 56.31% and 68.32%, respectively, and the peak flow reduction rate is 48.58%. The control rate for pollutants of TP, TN, SS and COD is 72.92%, 74.82%, 74.44% and 73.89%, respectively. However, with the increase of rainfall intensity, the runoff control rate and the pollutant concentration control rate decreased, showing a significant negative correlation between the fourth and fifth power functions. After calculation, green roof can produce better economic and environmental benefits.

Key words: SWMM; green roof; control rate; economic benefit; environmental benefit

(上接第 102 页)

参考文献:

- [1] 顾淦臣,束一鸣,沈长松. 土石坝工程经验与创新[M]. 北京:中国电力出版社,2004.
- [2] 马洪琪,赵川. 糯扎渡水电站掺砾黏土心墙堆石坝基础理论与关键技术研究[J]. 水力发电学报,2013,

32(2):208-212.

- [3] 熊亮. 长河坝水电站大坝砾石土心墙料含水率调整工艺及设备选择[C]//高坝建设与运行管理的技术进展—中国大坝协会 2014 学术年会论文集,2014.
- [4] 陶益民,刚永才. 毛尔盖水电站大坝砾石土心墙防渗土料的特性研究及质量控制[J]. 水电站设计,2012,28(增刊 1):29-33.

Field Test of Water Filling Technology of Impervious Gravel Soil for 300 m Height Earth Core Rockfill Dam

GUO Yong¹, ZHANG Jian-bo¹, ZHANG Sheng¹, HU Yong-fu², WANG Zhao-ying²

(1. HydroChina Guiyang Engineering Corporation, Guiyang 550081, China;

2. Huaneng Lancang River Hydropower Inc., Kunming 650214, China)

Abstract: Aiming at the low natural moisture content of natural wide graded gravel anti-seepage soil material in 300 m level high core wall rockfill dam, field contrast test between the process of "belt conveyor filling water + stacker heap + bin stuffy material" and the process of "layered paving + pipe network water + bin stuffy material" was carried out to verify the rationality and feasibility of the relevant filling water process. The test results show that the combination process of belt conveyor with water is superior to the pipe network stratified water process, mainly manifested that the belt conveyor automatic water system can achieve real-time, efficient and accurate automatic water filling soil; After water replenishment, the soil material is transported by the belt and piled by the stacker, which can realize automatic and uniform piling. After adding water to soil material, the moisture content inside the soil material is basically stable during 3-4 days of smother, and the time required for smother is short. This paper also put forward the improvement measures of water filling process of belt conveyor. The improved process of "water filling of belt conveyor + stoker + silo boring" can provide reference for soil water content adjustment of similar earth-rock dam.

Key words: 300 m grade earth core rockfill dam; natural broad-graded gravel soil; impervious soil material modification; increase of water content; technical process