

城市透水性下垫面降雨径流污染的影响因素研究

李洁, 刘珊珊, 汪志荣* (天津理工大学环境科学与安全工程学院, 天津 300384)

摘要 [目的]探究城市透水性下垫面降雨径流污染的影响因素。[方法]从降雨径流产汇流特性和污染物冲刷规律角度,在实验室条件下对3种透水性下垫面(草地、透水砖、压实裸地)的降雨径流污染进行正交试验。[结果]草地、透水砖及压实裸地的次降雨径流系数差异较大,分别为0.28~0.43、0.35~0.55、0.72~0.74,地表的溶解性污染物冲刷进入径流水体中的比例较高,冲刷率可达50.00%~88.00%。坡度和降雨强度极大地影响产流过程,是影响产汇流时间、径流水量和电导率的重要因素;流量峰值产生时间、电导率峰值产生时间、退水时间、退水量和径流系数主要取决于下垫面性质;降雨动能的影响大于下垫面的入渗量,是影响溶解性污染物冲刷效率的最主要因素。[结论]该研究可为海绵城市建设提供科学依据。

关键词 透水性下垫面;地表径流;正交试验;溶解性污染物

中图分类号 X522 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2017)10-0074-04

Study on the Influencing Factors of Rain-Runoff Pollution of Urban Permeable Underlying Surfaces

LI Jie, LIU Shan-shan, WANG Zhi-rong* (School of Environmental Science and Safety Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384)

Abstract [Objective] To study the influencing factors of rain-runoff pollution of urban permeable underlying surfaces. [Method] Based on the characteristics of rainfall runoff and pollutant scouring rule, orthogonal experiments were conducted to study the rainfall runoff pollution of three permeable underlying surface (grasslands, permeable bricks, bare land) under laboratory conditions. [Result] The results showed that the runoff coefficients of grassland, permeable brick and bare land were significantly different, which were 0.28-0.43, 0.35-0.55 and 0.72-0.74, respectively. The proportion of dissolved pollutants into runoff water was high, and the scouring rate can reach 50% -88%. The slope of the underlying surface and rainfall intensity were the most important factors affecting the runoff process, which influencing the runoff yield, runoff volume and conductivity. The time of peak runoff, peak conductivity and water withdrawal, the amount of water withdrawal and the coefficient of runoff mainly depend on the underlying surface properties. The influence of rainfall kinetic energy was larger than that of underlying surface infiltration, which was the most important factor affecting the scouring efficiency of dissolved pollutants. [Conclusion] The study can provide scientific basis for the construction of the city.

Key words Permeable underlying surface; Surface runoff; Orthogonal test; Soluble contaminant

城市水文学研究表明^[1],城市化使地表径流量增加,径流峰值提前,集中排放的城市地表径流引起了纳污水体的环境污染。城市地表径流是流域中各种自然地理因素和人类活动综合作用的产物,其中降雨和城市下垫面情况是影响城市降雨径流污染的两个根本因素^[2]。不同降雨强度、降雨动能、降雨量和降雨历时对地面污染物的冲刷、稀释和溶解作用不同^[3-4]。对于小汇水面,降雨量和降雨强度愈大、降雨历时愈短,则初期冲刷现象愈明显^[5]。两场降雨间隔时间越长,地面污染物积累越多,降雨径流污染越严重^[6]。透水性下垫面的地表径流具有稳定的调蓄、处理和收集利用的能力,且径流的初始冲刷效应不明显。近年来,我国提出的海绵城市理念认为地表径流是一种能够有效解决由不透水下垫面过多带来的降雨径流洪峰提前、峰值过大等一系列水资源问题的方法^[7]。笔者将城市下垫面污染物分为溶解性污染物和非溶解性污染物两大类,在实验室条件下研究降雨—径流过程中的溶解性污染物在透水性下垫面的冲刷规律,并对其影响因素进行正交试验分析,明确各影响因素之间以及影响因素与降雨产汇流—污染物特征要素之间的相关性及其显著性,旨在为海绵城市建设提供理论基础和实践性指导。

1 材料与方法

1.1 试验装置 该试验模拟系统包括人工模拟降雨装置和

典型城市透水性下垫面(透水砖、草地和土壤)模拟装置。降雨及其控制系统由降雨平台、针管式降雨器、供水箱构成。人工降雨平台长、宽、高2 m×1 m×6 m。分别设3、4、5、6 m 4个降雨高度,相应的降雨动能分别为 1.99×10^{-4} 、 2.67×10^{-4} 、 3.33×10^{-4} 、 3.99×10^{-4} J。降雨器为0.5 mm的医用针头按梅花状分布,每个针头的降雨面积为7.854 cm²,长、宽、高34 cm×30 cm×3 cm。供水由马氏瓶与储水箱完成。装置的降雨均匀度≥95%,降雨强度可调节范围为0.147~1.589 mm/min,下垫面为不锈钢槽,长、宽、高为120 cm×30 cm×50 cm,下部安装可自由升降的螺母以控制坡度,升降高度0~20 cm。径流控制断面处设漏斗集流,便于收集和观测地表径流和污染物。

透水砖:透水砖为城市停车场等铺设的镂空花砖,规格为40 cm×30 cm(透水与不透水面积比为31),透水砖镂空部位为种植黑麦草的压实土壤。

草地:采用城市绿化草皮铺设,草皮规格为30 cm×30 cm,并进行修剪使草皮高度一致。

压实土壤:钢槽中装填经烘干、研磨、过筛处理的壤土至40 cm深,土壤干容重1.40 g/cm³。

1.2 试验设计 根据水动力学特性,将降雨径流污染物分为溶解性污染物和非溶解性污染物两大类,选择氯化钠作为典型溶解性污染物,据天津月降尘量的研究成果,选择氯化钠的初始质量为10 g/m²。可溶性盐含量用电导率法测定。降雨开始,观测下垫面的产汇流情况,监测产汇流时间、径流量变化、流量峰值及其时间、监测时段径流的电导率变

基金项目 天津市科技计划项目(16YDJLJF00030)。

作者简介 李洁(1990—),女,江苏徐州人,硕士研究生,研究方向:城市地表径流。*通讯作者,教授,博士,硕士生导师,从事水土资源利用与环境研究。

收稿日期 2017-01-11

化,降雨停止后监测下垫面的退水过程。根据降雨强度选择取样间隔时间,径流形成初期取水样 3~5 个/min,30 min 后采集水样 1 个/min,当降雨历时较长,电导率和径流量变化

较平稳时,可适当延长采样时间。设计降雨历时 100 min。设 4 因素 3 水平正交试验方案(表 1),进行降雨—径流—污染物试验。

表 1 透水性下垫面降雨正交试验设计

Table 1 Orthogonal experimental design of rainfall on permeable underlying surface

水平 Level	因素 Factors			
	降雨动能(A) Rainfall energy 10^{-4} J	降雨强度(B) Rainfall intensity mm/min	坡度(C) Slope %	下垫面(D) Underlying surface
1	1.99	0.64	0.5	草地
2	3.99	1.21	5.0	透水砖
3	2.67	0.98	10.0	压实裸地

2 结果与分析

2.1 正交试验结果 将降雨过程中各个特征指标汇总于表 2 中。图 1 为降雨—径流—污染物的变化过程。

由图 1 可知,该试验系统可以较好地监测降雨—径流过程,径流过程呈现出涨水段和退水段,由于流域面积较小,在

较大的降雨强度下,涨水段在达到峰值后持续一段时间且径流量基本稳定。退水时间较短(2~13 min),且较迅速,由表 2 可知,各处理的退水量差异明显,特别是透水砖和草地下垫面,由于具有滞留径流水量的作用,退水过程相对滞后。

表 2 降雨试验特征指标

Table 2 The characteristics index of rainfall experiments

试验号 Test No.	因素 Factors				产流时间 Runoff time//s	汇流时间 Confluence time//s	电导率峰值 Conductivity peak// μ s
	A	B	C	D			
1	1	1	1	1	350	420	128
2	1	2	2	2	50	70	36
3	1	3	3	3	50	100	50
4	2	1	2	3	60	90	54
5	2	2	3	1	55	65	15
6	2	3	1	2	150	200	94
7	3	1	3	2	80	240	42
8	3	2	2	3	35	70	29
9	3	3	1	1	80	120	13

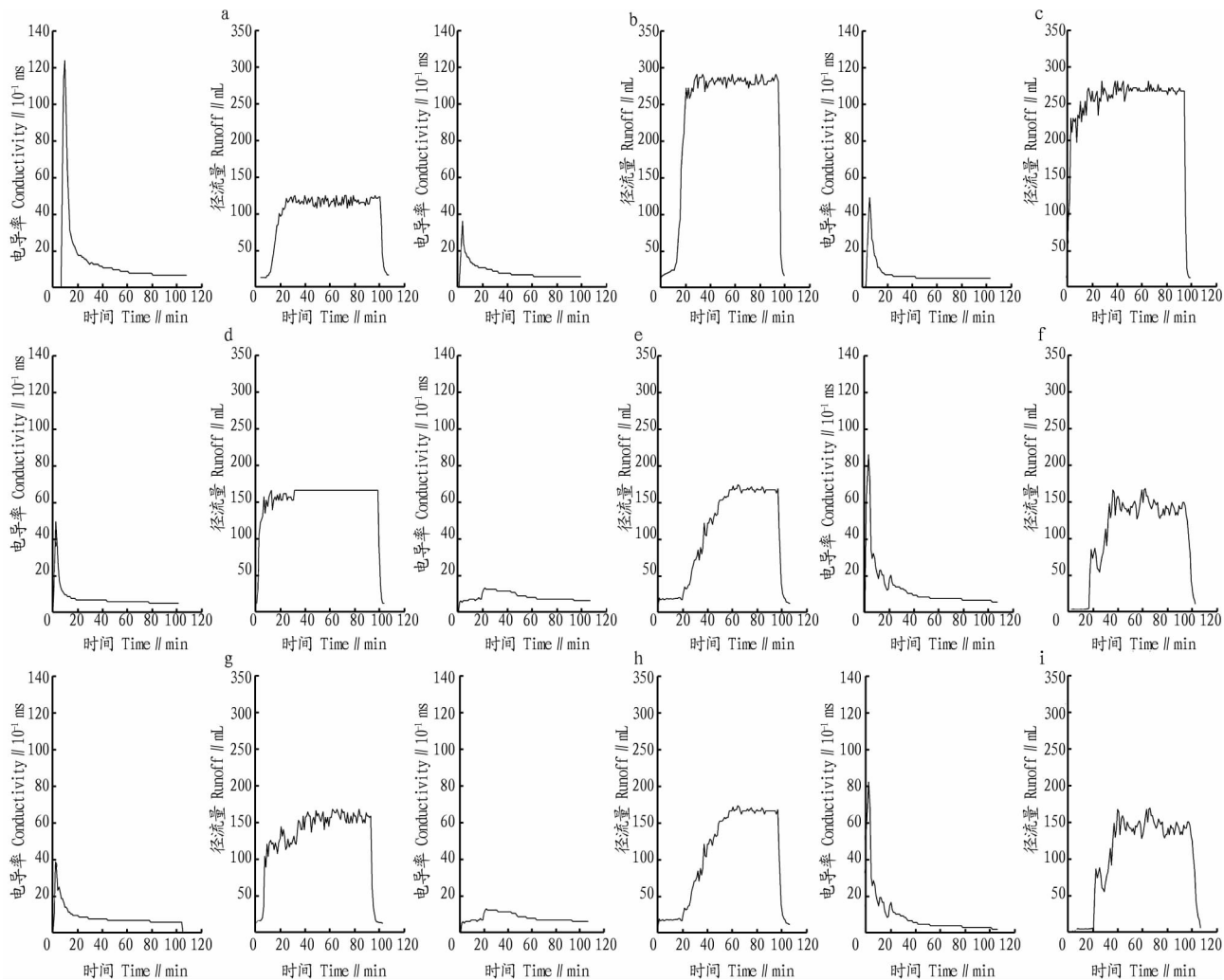
试验号 Test No.	峰值产生时间 Conductivity peak time min	流量峰值 Flow peak mL	流量峰值 产生时间 Peak discharge time//min	退水量 Water withdrawal mL	退水时间 Water withdrawal time//s	氯化钠冲刷率 NaCl washout rate//%	径流系数 Runoff coefficient
1	8	115	25	164	180	87.23	0.43
2	3	295	28	240	240	61.39	0.55
3	3	290	18	107	95	85.72	0.74
4	2	175	10	126	125	67.12	0.73
5	22	185	60	161	500	76.20	0.28
6	5	190	37	325	430	76.20	0.35
7	2	160	41	372	300	62.20	0.38
8	1	330	14	107	120	77.91	0.72
9	21	190	53	236	320	52.46	0.41

草地、透水砖及压实裸地的次降雨径流系数差异较大,分别为 0.28~0.43、0.35~0.55、0.72~0.74,这说明有植被的草地和透水砖相对于压实裸地,入渗量大大增加,有效削减了径流量。压实裸地不仅径流总量最大,峰值也最高。

从径流污染物的冲刷状况看,在降雨过程中,地表的污染物被冲刷进入径流水体中的比例较高,均超过 50.00%,溶解性污染物的冲刷率达 50.00%~88.00%。其中,降雨强度

和下垫面坡度及下垫面的入渗特性对冲刷率都有重要影响。

值得注意的是,洪峰与溶解性污染物峰值二者并不同步,后者会大大提前于前者。下垫面对径流量削减越大,二者的差异也越大。溶解性污染物的峰值与污染物总量并不一致,小雨强、小坡度在长时间的降雨条件下径流也会携带大量的溶解性污染物。



注: a~i 分别为 $A_1B_1C_1D_1$, $A_1B_2C_2D_2$, $A_1B_3C_3D_3$, $A_2B_1C_2D_3$, $A_2B_2C_3D_1$, $A_2B_3C_1D_2$, $A_3B_1C_3D_2$, $A_3B_2C_2D_3$, $A_3B_3C_1D_1$

Note: a~i were $A_1B_1C_1D_1$, $A_1B_2C_2D_2$, $A_1B_3C_3D_3$, $A_2B_1C_2D_3$, $A_2B_2C_3D_1$, $A_2B_3C_1D_2$, $A_3B_1C_3D_2$, $A_3B_2C_2D_3$, $A_3B_3C_1D_1$ respectively

图1 各处理降雨过程中径流水体的电导率与径流量变化

Fig.1 The change of conductivity and runoff during raining of each treatment

2.2 相关性分析 用 SPSS 软件统计分析的试验指标与各因素之间的 Pearson 相关性和显著性(0.05 和 0.01 水平), 结果见表 3。由表 3 可知, 尽管降雨动能会使地表受到冲击, 但在该实验条件下, 降雨动能与降雨—径流—污染物过程并无直接的相关性, 这说明降雨对地表污染物的冲刷及降雨动能的影响可以忽略。降雨强度与产流时间有较高负相关, 而与流量峰值呈较强正相关, 因此, 降雨强度越大, 加速产流, 从而增大流量峰值; 产流时间和流量峰值为负相关, 流量峰值是雨强和下垫面状况共同发挥作用的结果, 产流时间越短, 流量峰值则越大。电导率峰值直接受控于次降雨的产汇流时间, 并有着极强的正相关性, 而不是直接受控于降雨强度, 这说明溶解性污染物的冲刷特性是降雨特性与下垫面特性综合影响的结果, 虽然流量峰与溶解性污染物峰虽然不一定同时发生, 但是二者是共进退, 同时也预示着下垫面的退水越迅速。流量峰值产生时间和退水时间与径流系数也呈显著负相关, 流量峰值出现时间提前, 径流系数也会增大, 降雨停止后下垫面退水越迅速。

2.3 极差分析 极差分析是正交试验结果分析和判断各因

素的主次及试验的优水平和优组合的最常用方法。通过对不考察交互作用的正交试验表进行极差分析, 分析因素水平对试验指标的影响, 从而确定影响因素的主次顺序, 结果见表 4。

降雨强度是影响产汇流、流量峰值、电导率峰值的重要因素, 主要是由于较大降雨强度对下垫面的淋洗雨量较大, 产流坡面径流的势能加速了径流向集水断面的聚集, 大大加速产汇流过程, 并增加了稳定后的径流量, 溶解性污染物随着径流冲刷强烈。草地和透水砖的入渗量比压实裸地大, 对径流量的削减程度更高。下垫面坡度加速产汇流过程也使径流更快达到稳定。

对流量峰值产生时间、电导率峰值产生时间、退水量、径流系数的影响均呈现出下垫面的影响大于其余因素的影响程度, 其中下垫面入渗的影响强于坡度的影响(表 4)。随着降雨过程的延续, 各下垫面的表层土壤基本达到饱和, 当降雨停止时, 表面水量迅速消退, 主要取决于下垫面的渗水性能和坡面势能的大小, 压实裸地的退水速度较透水砖和草地快。较大坡度更有利于径流的汇集, 退水也就越迅速, 而降

雨动能和降雨强度的影响相对较小。

表 3 正交试验相关性分析

Table 3 Correlation analysis of orthogonal test

指标 Index		降雨 动能 Rainfall energy	降雨 强度 rainfall intensity	坡度 Slope	汇流 时间 Confluence time	产流 时间 Runoff time	电导率 峰值 Conductivity peak	电导峰值 产生时间 Conductivity peak time	流量 峰值 Flow peak	流量峰值 产生时间 Flow peak time	退水量 Water withdrawal	退水时间 Peak discharge time	氯化钠 冲刷率 NaCl washout rate	径流 系数 Runoff coefficient
降雨动能	相关性	1.000	0	0	-0.215	-0.273	-0.108	0.249	-0.317	0.262	0.101	0.546	-0.090	-0.279
Rainfall energy	显著性		1.000	1.000	0.578	0.477	0.781	0.518	0.406	0.496	0.796	0.129	0.817	0.467
降雨强度	相关性	0	1.000	0.127	-0.513	-0.674*	-0.547	0.266	0.723*	0.236	-0.214	0.270	-0.015	0.003
Rainfall intensity	显著性	1.000		0.746	0.158	0.046	0.128	0.488	0.028	0.542	0.580	0.482	0.969	0.993
坡度	相关性	0.000	0.127	1.000	-0.563	-0.397	-0.484	-0.108	0.262	0.052	-0.117	-0.020	0.107	0.149
Slope	显著性	1.000	0.746		0.115	0.291	0.187	0.783	0.495	0.894	0.765	0.959	0.784	0.703
汇流时间	相关性	-0.215	-0.513	-0.563	1.000	0.930**	0.874**	0.043	-0.642	-0.030	0.085	-0.005	0.437	-0.0343
Confluence time	显著性	0.578	0.158	0.115		0.000	0.002	0.913	0.062	0.940	0.828	0.991	0.240	0.365
产流时间	相关性	-0.273	-0.674*	-0.397	0.930**	1.000	0.825**	-0.089	-0.687*	-0.003	0.305	-0.018	0.331	-0.375
Runoff time	显著性	0.477	0.046	0.291	0.000		0.006	0.821	0.041	0.993	0.425	0.963	0.384	0.320
电导率峰值	相关性	-0.108	-0.547	-0.484	0.874**	0.825**	1.000	-0.346	-0.467	-0.347	0.083	-0.162	0.575	-0.085
Conductivity peak	显著性	0.781	0.128	0.187	0.002	0.006		0.362	0.206	0.361	0.832	0.676	0.105	0.829
电导峰值产生时间	相关性	0.249	0.266	-0.108	0.043	-0.089	-0.346	1.000	-0.353	0.827**	-0.016	0.647	-0.229	-0.625
Conductivity peak time	显著性	0.518	0.488	0.783	0.913	0.821	0.362		0.352	0.006	0.966	0.060	0.553	0.072
流量峰值	相关性	-0.317	0.723*	0.262	-0.642	-0.687*	-0.467	-0.353	1.000	-0.383	-0.363	-0.384	0.048	0.617
Flow peak	显著性	0.406	0.028	0.495	0.062	0.041	0.206	0.352		0.309	0.336	0.307	0.902	0.077
流量峰值产生时间	相关性	0.262	0.236	0.052	-0.030	-0.003	-0.347	0.827**	-0.383	1.000	0.492	0.890**	-0.378	-0.881**
Peak discharge time	显著性	0.496	0.542	0.894	0.940	0.993	0.361	0.006	0.309		0.178	0.001	0.316	0.002
退水量	相关性	0.101	-0.214	-0.117	0.085	0.305	0.083	-0.016	-0.363	0.492	1.000	0.561	-0.495	-0.650
Water withdrawal	显著性	0.796	0.580	0.765	0.828	0.425	0.832	0.966	0.336	0.178		0.116	0.176	0.058
退水时间	相关性	0.546	0.270	-0.020	-0.005	-0.018	-0.162	0.647	-0.384	0.890**	0.561	1.000	-0.245	-0.900**
Water withdrawal time	显著性	0.129	0.482	0.959	0.991	0.963	0.676	0.060	0.307	0.001	0.116		0.526	0.001
氯化钠冲刷率	相关性	-0.090	-0.015	0.107	0.437	0.331	0.575	-0.229	0.048	-0.378	-0.495	-0.245	1.000	0.193
NaCl washout rate	显著性	0.817	0.969	0.784	0.240	0.384	0.105	0.553	0.902	0.316	0.176	0.526		0.618
径流系数	相关性	-0.279	0.003	0.149	-0.343	-0.375	-0.085	-0.625	0.617	-0.881**	-0.650	-0.900**	0.193	1.000
Runoff coefficient	显著性	0.467	0.993	0.703	0.365	0.320	0.829	0.072	0.077	0.002	0.058	0.001	0.618	

注：* 表示在 0.05 水平（双侧）上显著相关；** 表示在 0.01 水平（双侧）上显著相关
 Note: * indicated significant correlation at 0.05 level (bilateral); ** indicated significant correlation at 0.01 level (bilateral)

对模拟污染物氯化钠的冲刷方面,各因素对其的影响从大到小依次为降雨动能(A)、下垫面(D)、坡度(C)、降雨强

度(B)(表4)。较小的坡度和较小的降雨强度均会使溶解性污染物更充分地溶解于径流雨水中,随径流冲刷而迁移。

表 4 正交试验极差分析

Table 4 Range analysis of orthogonal test

因素 Factors	产流时间 Runoff time//s	汇流时间 Confluence time//s	流量峰值 Flow peak mL	流量峰值 产生时间 Flow peak time//min	径流系数 Runoff coefficient %	退水量 Water withdrawal mL	退水时间 Water withdrawal time//min	电导率 峰值 Condu- ctivity peak μs	电导率峰 值产生时间 Conduct- ivity peak time//min	氯化钠 冲刷率 NaCl washout rate//%
A	255	335	150	37	0.36	204	540	51	17	13.00
B	350	545	360	32	0.05	160	255	174	14	0.55
C	435	510	295	67	1	252	445	225	21	5.90
D	340	345	295	96	1.07	597	660	120	33	10.32
主次顺序 Primary order	C > B > D > A B > C > D > A B > C = D > A D > C > A > B D > C > A > B D > C > A > B D > A > C > B B > A > C > D D > C > B > A A > D > C > B									
优组合 Superior combination	A ₁ B ₁ C ₁ D ₁	A ₁ B ₁ C ₁ D ₁	A ₁ B ₂ C ₂ D ₃	A ₃ B ₃ C ₃ D ₁	A ₁ B ₂ C ₃ D ₃	A ₃ B ₃ C ₁ D ₂	A ₂ B ₂ C ₁ D ₁	A ₁ B ₁ C ₁ D ₂	A ₂ B ₃ C ₁ D ₁	A ₂ B ₂ C ₁ D ₁

3 结论

该研究表明,在次降雨过程中,降雨动能、降雨强度、下垫面类型和坡度及对径流流量、径流总量和径流过程以及溶解性污染物的冲刷特性都具有重要影响,主要表现在以下几方面:

径流量和径流峰值。地表的污染物被冲刷进入径流水体中的比例较高,都超过了 50.00%,溶解性污染物的冲刷率可以达到 55.00% ~ 88.00%。

(2) 下垫面坡度和降雨强度条件是影响产汇流时间、径流水量和电导率的重要因素,坡度较小的下垫面在大雨条件下,产汇流时间短,电导率和流量峰值较大。

(1) 草地、透水砖以及裸地的降雨径流系数分别为 0.28 ~ 0.43、0.35 ~ 0.55、0.72 ~ 0.74,草地和透水砖可有效削减

2.1 不同大豆浸泡时间对发酵酶活的影响 由图1可知,随着浸泡时间的增加,检测到的吸光度呈先增加后降低的趋势。这是由于浸泡时间短,大豆吸水不充分,发酵过程中水分不足,导致拉丝物质少且黏性较差,出现各部分传质不均匀的现象,限制了纳豆菌的生长繁殖;当浸泡时间过长,大豆吸水膨胀,发酵过程中得不到足够的氧气,也会影响纳豆激酶的酶活。因此选择浸泡时间为8 h时作为最佳工艺控制点。

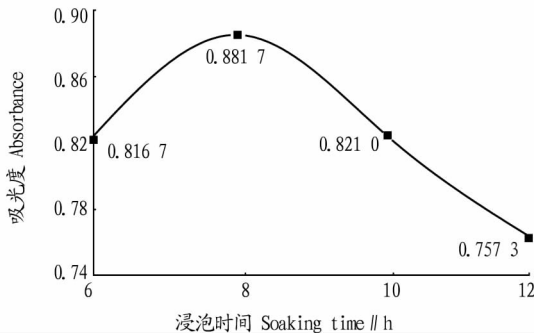


图1 不同大豆浸泡时间对发酵酶活的影响

Fig.1 Effects of different soybean soaking time on natto kinase activity

2.2 不同发酵接种量对发酵酶活的影响 由图2可知,吸光度的峰值位于接种量10%处,这是由于如果接种量过小,纳豆菌种会用较长时间来适应新的环境,从而延长发酵时间,而接种量过大,纳豆菌种会因为生长过快消耗大量营养

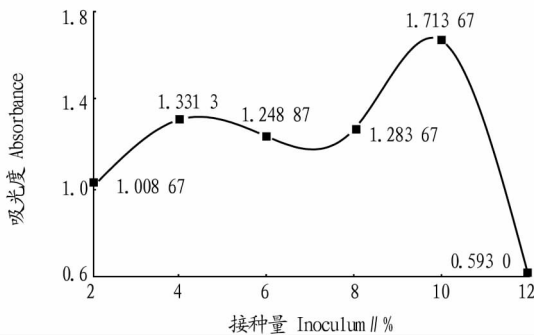


图2 不同发酵接种量对发酵酶活的影响

Fig.2 Effects of different fermentation inoculum on natto kinase activity

物质,并且氧气量不足。考虑到营养成分的利用率,因此选择接种量10%作为最佳工艺点(前提是菌群密度为 1.93×10^7 个/mL菌液)。

2.3 不同发酵时间对发酵酶活的影响 由图3可知,在发酵时间为24~48 h时检测出的吸光度呈不断增加的趋势,发酵时间48 h时达到最高,之后随着发酵时间增加,检测到的吸光度逐渐降低。这是由于随着发酵时间的增加,发酵后期营养物质减少,纳豆菌体逐渐老化,因此将48 h作为最佳发酵时间。

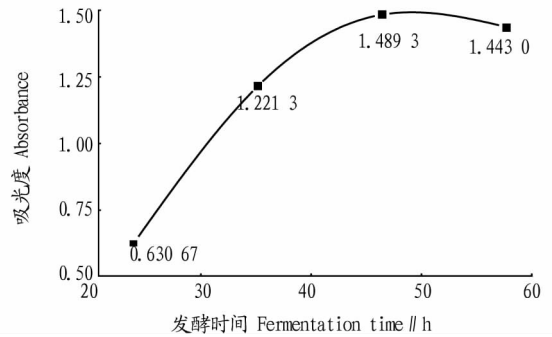


图3 不同发酵时间对发酵酶活的影响

Fig.3 Effects of different fermentation time on natto kinase activity

3 结论

该试验通过改变大豆浸泡时间、芽孢杆菌接种量、发酵时间3个因素制作纳豆,利用TAME法测定纳豆中纳豆激酶酶活,最终确定高产纳豆激酶最佳工艺条件为浸泡8 h,接种量为10%,发酵时间48 h,制得纳豆的纳豆激酶酶活最高。

参考文献

- [1] 苏雪燕. 纳豆激酶分离、纯化及其酶学性质研究[D]. 曲阜:曲阜师范大学,2013.
- [3] 梁一博,白亮,唐鑫媛,等. 纳豆激酶产品研究现状及其进展[J]. 农产品加工·学刊,2011(4):23-25.
- [2] 付利,杨志兴. 纳豆激酶的研究与应用[J]. 中国生物工程杂志,1995,15(5):46-49.
- [4] 奚晓琦,王加启,卜登攀,等. 纳豆芽孢杆菌的分离鉴定及纳豆激酶高产菌株的筛选[J]. 东北农业大学学报,2009,40(11):69-75.
- [5] 熊迎新,尹宗宁,杨超,等. 纳豆激酶活性测定方法的研究[J]. 药物生物技术,2006,13(2):140-143.
- [6] 孙清荣. 纳豆食品生产状况调研[J]. 食品工程,2010(4):16-18.
- [7] 李睿,阮文辉. 纳豆激酶NKII分离纯化及其酶促动力学研究[J]. 中国酿造,2016,35(7):89-92.

(上接第77页)

(3) 流量峰值产生时间、电导率峰值产生时间、退水时间退水量和径流系数则主要取决于下垫面性质,入渗性能强、坡度小的下垫面的流量峰值和电导率峰值均出现延后,径流系数变小,降雨停止以后,迅速退水且退水量少。

(4) 降雨动能的影响大于下垫面的入渗量,是影响溶解性污染物冲刷效率的最主要因素,降雨动能较小,入渗量较强的草地和透水砖的冲刷效率更高。

参考文献

- [1] 李立青,尹澄清,何庆慈,等. 城市降水径流的污染来源与排放特征研

究进展[J]. 水科学进展,2006,17(2):288-294.

- [2] 任玉芬,王效科,欧阳志云,等. 北京城市典型下垫面降雨径流污染初始冲刷效应分析[J]. 环境科学,2013,34(1):373-378.
- [3] 张千千,李向全,王效科,等. 城市路面降雨径流污染特征及源解析的研究进展[J]. 生态环境学报,2014,23(2):352-358.
- [4] 李倩倩,李铁龙,刘大喜,等. 天津市不同土地利用类型雨水径流污染特征[J]. 环境污染与防治,2011,33(7):22-26.
- [5] 车伍,张伟,李俊奇. 城市初期雨水和初期冲刷问题剖析[J]. 中国给水排水,2011,27(14):9-14.
- [6] 李立青,尹澄清,孔玲莉,等. 2次降雨间隔时间对城市地表径流污染负荷的影响[J]. 环境科学,2007,28(10):2287-2293.
- [7] 孙艳伟,魏晓妹, POMEROY C A. 低影响发展的雨洪资源调控措施研究现状与展望[J]. 水科学进展,2011,22(2):287-293.