

琿乌高速公路路面径流污水湿地 净化模式

赵彦博¹, 孙明阳^{1,2}

¹吉林建筑大学艺术设计学院, 吉林 长春

²中国科学院东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春

收稿日期: 2022年9月6日; 录用日期: 2022年10月5日; 发布日期: 2022年10月12日

摘要

以吉林省琿乌高速公路路面径流为研究对象, 分析了径流的水质特性和污染物流出规律, 并从有效去除主要污染物的角度, 考虑在排水系统中采用人工湿地处理技术。利用人工湿地k-C*模型以及相关经验获得人工湿地的参数, 其基本模式为: 人工湿地位于公路两侧, 分别收集、处理公路两边路面径流污水, 以1 km长路段为一个雨水收集单位, 单侧湿地面积191.6 m², 平均水深0.5 m。

关键词

路面径流, 径流污染, 人工湿地, 污水净化, 高速公路

The Pattern of Wetland for Purifying Road Runoff Pollution of Hunchun-Ulanhaote Expressway

Yanbo Zhao¹, Mingyang Sun^{1,2}

¹College of Art and Design, Jilin Jianzhu University, Changchun Jilin

²Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun Jilin

Received: Sep. 6th, 2022; accepted: Oct. 5th, 2022; published: Oct. 12th, 2022

Abstract

Taking the road surface runoff of Hunchun-Ulanhaote Expressway in Jilin Province as the research

object, we analyzed the water quality characteristics and pollutant outflow law of the runoff, and considered the artificial wetland treatment technology in the drainage system from the perspective of effective removal of major pollutants. The parameters of the artificial wetland were obtained using the artificial wetland k-C* model and related experience. The basic model is: the artificial wetland is located on both sides of the highway, collecting and treating the road runoff sewage on both sides of the highway respectively, with a 1 km long road section as a rainwater collection unit, a single side wetland area of 191.6 m², and an average water depth of 0.5 m.

Keywords

Road Runoff, Runoff Pollution, Artificial Wetland, Sewage Purification, Expressway

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着国内交通事业的发展, 公路通车里程不断增加, 频繁的交通活动使得路面径流污染越发严重。降落到公路路面上的雨水含有空气中的尘埃和大气中的微量杂质, 形成径流后对路面进行冲洗, 带走路面上由于车辆的通行而形成的大量重金属、碳氢化合物、橡胶和燃油等污染物质。同时, 车辆运输时洒、冒、滴、漏的有害物质, 在水淋洗作用下排入农田或受纳水体, 造成生态环境质量的下降[1]。

国际上公认的路面径流净化措施是因地制宜地采用各种生态方法来对路面雨水径流进行处理, 根据不同地域的气候特征、降雨规律、地形特征等进行有针对性的设计[2]。吉林省珲乌高速公路属于既成道路, 在原有道路设施的基础上增加净化设施受到很大限制。本文在分析公路路面径流污染特性的基础上, 在排水系统中增加人工湿地, 处理径流污水。以最小的工程措施, 满足净化的基本需求, 同时还能能为湿地生物提供栖息场所, 最大程度地恢复路域的生态功能, 可为同类型的污水净化工程提供借鉴。

2. 材料与方法

2.1. 调查区

珲乌高速公路(珲春 - 长春段)地处长吉图开发开放先导区, 由东到西依次经过图们、延吉、安图、敦化、蛟河、吉林, 全长 460 多公里。全线地处吉林省东部的长白山区与西部平原地区的过渡地带, 海拔高度 137~400 m, 植被类型丰富。区域属于大陆季风气候, 四季分明, 年平均气温 5.1℃, 年均降水量 655 mm, 年平均风速 4.5 m·s⁻¹。公路设计行车速度 120 km·h⁻¹, 车道宽度 2 × 2 × 3.75 m, 路基宽度 25.5 m [3], 目前只在局部低填方路段的坡脚进行了单排行道树形式的绿化。

公路沿线以农田、林地、草地为主, 偶有村庄及城市; 全线跨越小型溪流 10 余条, 为路面径流污水的主要受纳水体。

2.2. 公路路面径流污染调查

于 2020 年 6~8 月对珲乌高速公路全线路面径流进行取样监测。约每隔 50 km 设 1 个取样点, 共设样点 10 个, 如图 1 所示。由于公路的路面排水采用分散漫流和集中截留两种形式, 因此在路缘石内侧截留的雨水径流、边坡急流槽内或者排水边沟内获取样品。

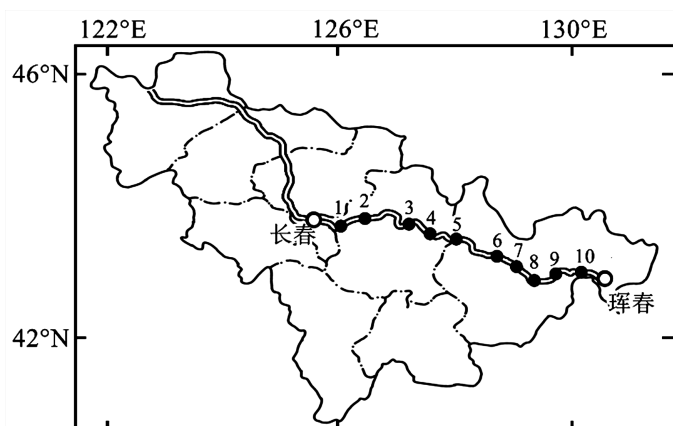


Figure 1. Pollution monitoring section location of Hunchun-Ulanhaote Expressway

图 1. 高速公路污染监测断面位置

样品采集的具体方法为: 在形成径流的 0~60 min 内, 用聚乙烯瓶(1 L)每隔 10 min 采水样一次; 取样的同时, 由 JS-2 型虹吸式雨量计同步记录降雨特征。在实验室进行水质分析, 指标有固体悬浮物(SS)、化学需氧量(COD)、五日生化需氧量(BOD₅)、总磷(TP)、总氮(TN)、铅(Pb)、锌(Zn)和石油类, 其测定方法[4]如表 1 所示。

Table 1. Pollutants and their determination methods
表 1. 污染物及其测定方法

污染指标	测定方法
SS	103℃~105℃烘干称重法
COD	重铬酸钾法
BOD ₅	稀释接种法
TP	钼酸铵分光光度法
TN	紫外分光光度法
Pb、Zn	原子吸收分光光度法
石油类	红外分光光度法

2.3. 人工湿地几何参数计算

湿地主要通过水生植物吸收、固定和转化水中的污染物质, 从而净化水体。若要使水中的每一个污染物达标, 所需湿地的面积就必须增加。湿地的面积应为各污染物达标所需的最大面积。基于人工湿地 k-C*模型[5]获得的计算公式如下:

$$A_s = \frac{0.0365Q}{k} \ln \frac{C_i - C^*}{C_e - C^*} \quad (1)$$

式中, A_s 为湿地的表面积(ha); Q 为污水平均流量(m³/d); k 为一级反映速率常数(m/年); C_i 为进水浓度(mg/L); C_e 为出水浓度(mg/L); C^* 为背景值(mg/L)。

假设径流污水全部由降落到路面上的雨水形成, 那么其流量可用下式计算[6]:

$$Q = q\Psi F \quad (2)$$

式中, Q 为雨水流量(L/s); q 为设计暴雨强度[L/(s·hm²)]; Ψ 为径流系数; F 为汇水面积(hm²)。本文设计暴雨强度 q 采用长春市暴雨强度公式进行计算[7]:

$$q = \frac{1618.165 \times (1 + 0.841 \lg P)}{(t + 9.930)^{0.704}} \quad (3)$$

式中, P 为暴雨重现期, 取 1 a; t 为设计降雨历时, 本文主要为路面集水时间, 经验值取 10 min。

3. 结果与分析

3.1. 公路路面径流污染特性分析

3.1.1. 水质特性

监测到最典型的降雨事件发生于 7 月 21 日的长春市东郊(样点 1), 其降雨强度接近吉林省平均强度, 实测水质变化过程数据列于表 2。

Table 2. Pavement runoff quality in the eastern suburb of Changchun (section 1)

表 2. 长春东郊(断面 1)路面径流水质

项目	时间	2020 年 7 月 21 日					
		10 min	20 min	30 min	40 min	50 min	60 min
SS (mg/L)		201	251	169	156	187	175
COD (mg/L)		17	35	5	2	11	7
BOD ₅ (mg/L)		1.4	1.5	0.7	0.2	1.0	0.8
TP (mg/L)		0.12	1.17	0.11	0.10	0.10	0.09
TN (mg/L)		0.011	0.014	0.009	0.005	0.007	0.008
Pb (mg/L)		0.008	0.052	0.007	0.006	0.005	0.004
Zn (mg/L)		0.007	0.060	0.006	0.004	0.005	0.003
石油类(mg/L)		0.8	1.0	0.8	0.5	0.5	0.4

由于琿乌高速公路沿线位于长白山西麓丘陵区域, 拥有大量的林地, 因此排入林地的污水应执行《污水综合排放标准 GB 8978-1996》的 I 级标准和《地表水环境标准 GB 3838-2002》中的 III 类标准, 详见表 3。

Table 3. Comparison table of water quality standards (mg/L)

表 3. 水质标准对照表单位(mg/L)

标准	污染物	SS	COD	BOD ₅	TP	TN	Pb	Zn	石油类
		污水综合排放标准 I 级	70	100	30	0.1		1.0	2.0
地表水环境标准 III 类			20	4	0.2	1.0	0.05	1.0	0.05

将监测结果与水质标准进行对比, 可以看出琿乌高速公路路面径流雨水的主要污染物为 SS 和 COD, 而石油类、BOD、TP 污染情况次之。BOD₅ 与 COD 比值为 0.07, 可见径流的可生物降解性差, 不适合用生物处理方法处理。此外, 从全线多次的监测结果上看, 路面径流污水中污染物的浓度在不同地区以及不同监测时间的变化范围都很大, 这与交通量、降雨前晴天天数、降雨状况、集雨路段长度等有关。

3.1.2. 污染物出流规律

根据表 2 数据绘制污染物出流变化过程曲线, 分析不同类型污染物的出流规律。从图 2 中可看出, 在形成径流的初期 30 min 内污染物浓度较大, 随后污染物浓度呈逐渐降低趋势, 说明路面径流初期效应显著。可见, 只要将初期雨水进行处理即可实现净化水体的目的。

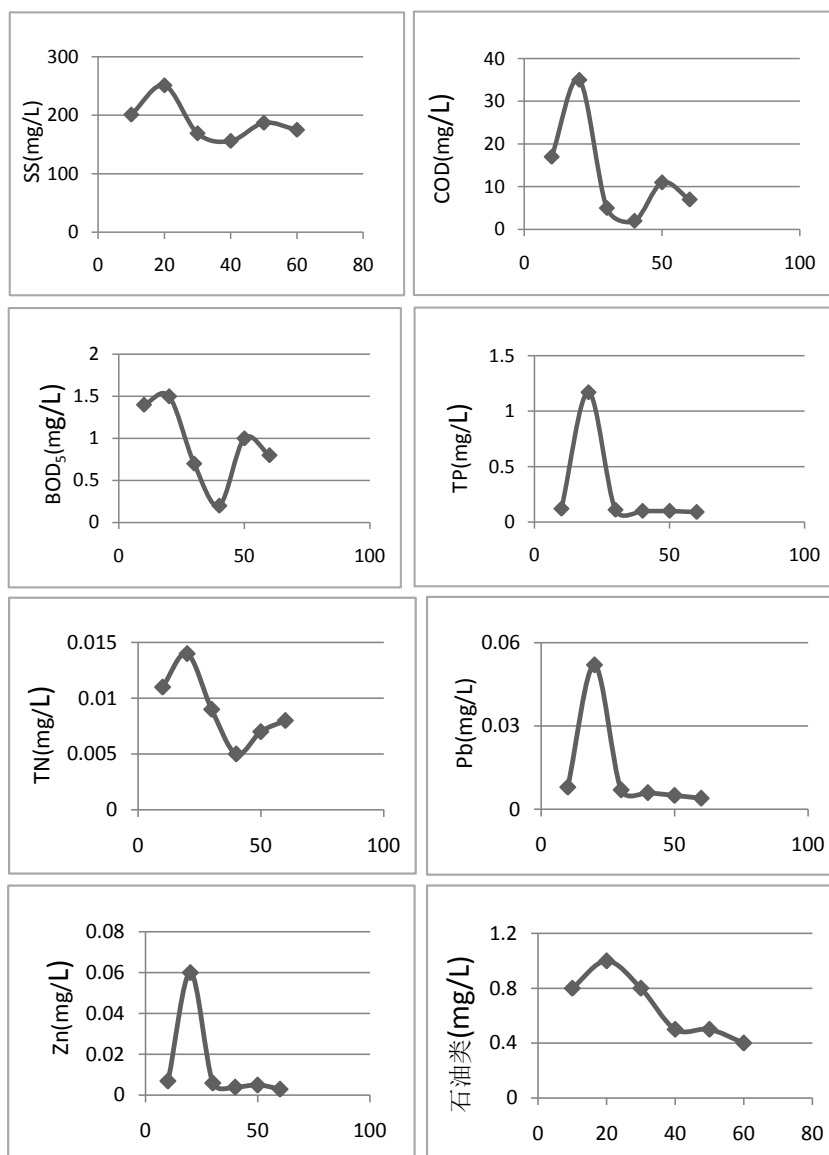


Figure 2. Curve of water quality parameters changing with runoff time

图 2. 水质参数随径流时间变化曲线

3.2. 人工湿地模式

3.2.1. 湿地类型选择

按照布水方式的不同, 人工湿地可以分为表面流人工湿地和潜流人工湿地(包括水平潜流和垂直潜流)两种。潜流人工湿地是污水在湿地的地表以下流动, 可充分利用内部填料、植物根系及其表面生长的生物膜协同作用的生物、物理、化学等各类作用, 其优点是污染负荷和水力负荷承受能力强, 不产生异味,

处理效果受气候的影响小[8], 缺点是构造较复杂、投资高、运行管理要求较高。

而表面流人工湿地是污水在湿地的土壤表层流动, 水中有机物的去除是由植物水下茎、杆上的生物膜来完成, 而悬浮颗粒物则依靠植物根、茎的截流作用而捕集。其最主要的优点是能够有效去除 SS, 此外还有投资低、运行成本低、管理维护简单等优点, 缺点是处理负荷小, 夏季可能会孳生蚊蝇, 产生异味[9]。

鉴于琿乌高速公路路面径流污染最主要的污染物为 SS, 且总体污染状况相对较轻; 公路远离聚居敏感点, 不必担心蚊蝇的滋生; 公路里程较长管理维护不便, 因此适合建设表面流人工湿地。

3.2.2. 几何参数设计

人工湿地位于道路两侧, 分别收集、处理两侧路面径流污水。以 1 km 路段为例, 路面宽度按 12 m 计算, 则单侧路面汇水面积 $F = 0.6 \text{ hm}^2$, 再由公式(3)可得到最大暴雨强度 $q = 197 \text{ L/(s}\cdot\text{hm}^2)$, 代入公式(2)即可求得路面径流污水的平均流量 $Q = 383.0 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

以净化径流主要污染物 SS 为例, 初期雨水(前 30 min)径流 SS 平均浓度为 207 mg/L, 按照相关标准, SS 的出水浓度应达到 70 mg/L。根据公式(1)求得湿地的表面积 A_s 为 188.7 m^2 , 以上计算过程相关参数列于表 4。

人工湿地水深一般不超过 0.6 m, 设计中取平均水深 $h = 0.5 \text{ m}$; 为有效去除 SS, 目前普遍认为表面流湿地水流线速度一般低于 100 m/d; 令湿地宽度为 W , 长度为 L , 则 $Q/(Wh) \leq 100 \text{ m/d}$, 可得 $W \geq 7.7 \text{ m}$; 当 $W = 7.7 \text{ m}$ 时, $L = 22.6 \text{ m}$ 。

Table 4. Constructed wetland parameters

表 4. 人工湿地参数

设计参数	数值	设计参数	数值
暴雨重现期(a)	1	SS 进水浓度(mg/L)	207
设计暴雨强度[L/(s·hm ²)]	197	SS 出水浓度(mg/L)	70
径流系数	0.9	背景值(mg/L)	14.2
污水平均流量(m ³ /d)	383.0	速率常数(m/年)	1000

3.2.3. 植物的选择

人工湿地宜与道路绿化相结合, 就地吸附、降解路面雨水污染, 减少道路交通对环境的危害[10]。湿地植物的选择在满足净化能力的同时, 应以本地植物为主。因此在设计中优先选择芦苇、香蒲、菖蒲、凤眼莲、美人蕉等; 此外, 也可根据公路各段落的自然条件模拟当地湿地和水域沿岸浅水区的群落类型进行种植(详见表 5), 形成挺水、浮水、沉水植物错落有致的人工湿地系统。

Table 5. Main community types in shallow water areas along wetlands and waters

表 5. 湿地和水域沿岸浅水区主要群落类型

植被类型	主要群落类型
沼泽植被	芦苇沼泽、香蒲沼泽
挺水植被	香蒲 - 水芹 - 泽泻群落、苔草 - 稗 - 水葱群落、芦苇 - 菰 - 香蒲群落
浮水植被	浮萍 - 紫萍群落、芡 - 菱群落、眼子菜群落
沉水植被	菹草 - 茨藻群落、金鱼藻 - 线叶眼子菜 - 黑藻群落、竹叶眼子菜 - 穗状狐尾藻群落

4. 结论与讨论

4.1. 结论

从珲乌高速公路路面径流的水质特性与管理维护方面考虑, 表面流人工湿地是有效且相对合理的选择; 从污染物流出规律上考虑, 只要净化初期(30 min)径流内的污染物, 即可实现净化水体的目的; 在此基础上, 利用人工湿地 k-C*模型计算出所需湿地的面积, 并依据相关经验获得珲乌高速公路人工湿地相关参数, 其基本模式如图 3:

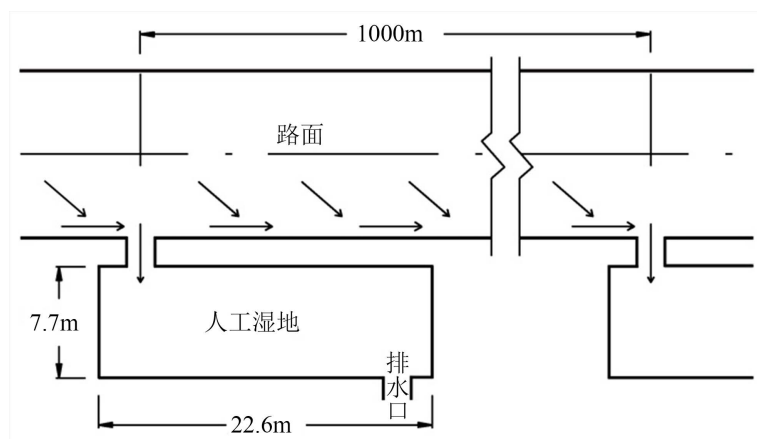


Figure 3. Wetland plan for purification of road runoff sewage
图 3. 净化路面径流污水湿地平面图

由于无动力要求, 本模式不设置雨水调节池, 所收集雨水仅依靠重力, 直接进入人工湿地系统。由于不同土壤渗滤介质对 SS 的去除效果无显著差别[11], 一般可选用自然土壤加砾石、粗砂或灰渣为基质。为保证进出水通畅, 床底设置 1%坡度。

4.2. 讨论

由于珲乌高速公路跨越不同地理区域, 沿线各地区采用的湿地模式应结合当地实际情况进行调整。除径流雨水中主要污染物质有所不同以外, 重点是由于降水量的不同而引起的径流污水流量的变化。在遵循上述设计思路的前提下, 结合道路周边用地情况, 通过调整单个湿地之间的距离(相当于调整路面雨水的收集面积)来调整湿地面积。

基金项目

吉林省教育厅“十三五”科学技术项目“珲乌高速公路(珲春-长春段)沿线生态景观模式研究”(JJKH20170252KJ)。

参考文献

- [1] 林才奎, 周晓航, 夏振军. 公路生态工程学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [2] 袁庆洲. 公路路面径流污染防治与综合利用技术研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2019.
- [3] 新华社. 长吉图大通道贯通吉林珲春至图们高速建成通车[EB/OL]. http://www.gov.cn/jrzq/2010-09/27/content_1710979.htm, 2010-09-27.
- [4] 中华人民共和国环境保护总局. GB 3838-2002 地表水环境质量标准[S]. 北京: 中国环境出版集团, 2002.
- [5] 卢正宇, 李华, 孔亚平, 等. 广州绕城高速公路(九江-小塘段)桥面径流生态处理系统设计[J]. 公路, 2008(4):

191-196.

- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50014-2006 室外排水设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2011.
- [7] 许晖, 王艳萍, 张亮, 等. 长春市暴雨强度公式编制和雨型确定[J]. 气象灾害防御, 2014(4): 30-32.
- [8] 王昊, 陈建伟, 何绪文. 潜流湿地去除污水处理厂二级出水的处理效果[J]. 湖北农业科学, 2013, 52(6): 1277-1279.
- [9] 戴清. 表面流人工湿地在崇启高速地表径流处理中的应用[J]. 黑龙江交通科技, 2011(10): 31-32.
- [10] 姚忠勇, 殷利华, 万敏. 武汉黄土公路绿化景观生态对策初探[J]. 湖北农业科学, 2012, 51(1): 90-93.
- [11] 聂发辉, 向速林, 闵露艳, 等. 不同渗滤介质系统处理雨水径流模拟试验研究[J]. 湖北农业科学, 2012, 23(12): 5318-5323.